ニュートリノ質量と
二重ベータ崩壊探索実験

丸藤祐仁
東北大学ニュートリノ科学研究センター
2017年11月11日

大阪ワークショップ 2017 「地上実験で検証可能な新物理」@大阪大学

以下の発表等を参考にしました

Kimihiro Okumura, TAUP 2017
Hyper-Kamiokande Design report (2016)
塩澤眞人, CRC将来計画タウンミーティング(2017)
Kirk Bays, TAUP 2017
Albert De Roeck, Lepton Photon 2017
Zelimir Djurcic, PPC 2015
Sanshiro Enomoto DBD16
Christian Weinheimer, TAUP 2017
Walter C. Pettus, TAUP 2017
B. Monreal and J.Formaggio, PRD 80 (2009) 051301
Bernhard Schwingernheuer, Leptom photon 2017
Oliviero Cremonesi, TAUP2017
Luciano Pandola, TAUP 2017
Caio Licciardi, TAUP 2017

はじめに

ニュートリノ振動実験より

分かったこと

ニュートリノは質量を持つ

ニュートリノ振動パラメータ(θ_{12}, θ_{23}, θ_{13} , Δm^2_{12}, Δm^2_{23}, Δm^2_{13})

質量階層構造は不明

$\nu_3 > \nu_2 > \nu_1$ (正常階層構造) ?

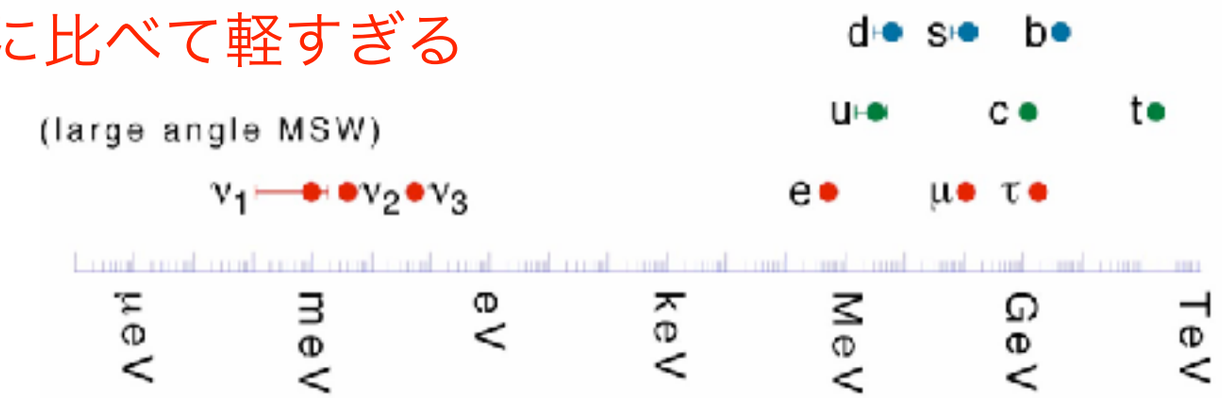
$\nu_2 > \nu_1 > \nu_3$ (逆階層構造) ?

質量の絶対値も不明

$2.31 < \Delta m^2 / 10^{-3} < 2.49$ eV^2

$7.35 < \delta m^2 / 10^{-5} < 7.71$ eV^2

ニュートリノは他のフェルミオンに比べて軽すぎる



はじめに

ニュートリノ振動実験より

分かったこと

ニュートリノは質量を持つ

ニュートリノ振動パラメータ(θ_{12}, θ_{23}, θ_{13}, Δm^2_{21}, Δm^2_{32}, Δm^2_{31})

質量階層構造は不明

$\nu_3 > \nu_2 > \nu_1$ (正常階層構造)？

$\nu_2 > \nu_1 > \nu_3$ (逆階層構造)？

質量の絶対値も不明

ニュートリノは他のフェルミオンに比べて軽すぎる

加速器ニュートリノ

大気ニュートリノ

原子炉ニュートリノ

主にベータ崩壊の測定

GRBニュートリノ

二重ベータ崩壊の測定

質量階層構造の測定

質量階層構造の測定

ニュートリノ振動 (電子ニュートリノ出現モード)

$$P(\nu_\mu \to \nu_e) = 4c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \cdot \sin^2 \Delta_{31}$$

$$+8c_{13}^2 s_{12} s_{13} s_{23}(c_{12}c_{23}\cos\delta_{CP} - s_{12}s_{13}s_{23}) \cdot \cos\Delta_{32} \cdot \sin\Delta_{31} \cdot \sin\Delta_{21}$$

$$-8c_{13}^2 c_{12}c_{23}s_{12}s_{13}s_{23}\sin\delta_{CP} \cdot \sin\Delta_{32} \cdot \sin\Delta_{31} \cdot \sin\Delta_{21}$$

$$+4s_{12}^2 c_{13}^2(c_{12}^2 c_{23}^2 + s_{12}^2 s_{23}^2 s_{13}^2 - 2c_{12}c_{23}s_{12}s_{23}s_{13}\cos\delta_{CP}) \cdot \sin^2\Delta_{21}$$

$$-8c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \cdot \frac{aL}{4E_\nu}(1-2s_{13}^2) \cdot \cos\Delta_{32} \cdot \sin\Delta_{31}$$

$$+8c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \frac{a}{\Delta m_{31}^2}(1-2s_{13}^2) \cdot \sin^2\Delta_{31},$$

物質効果

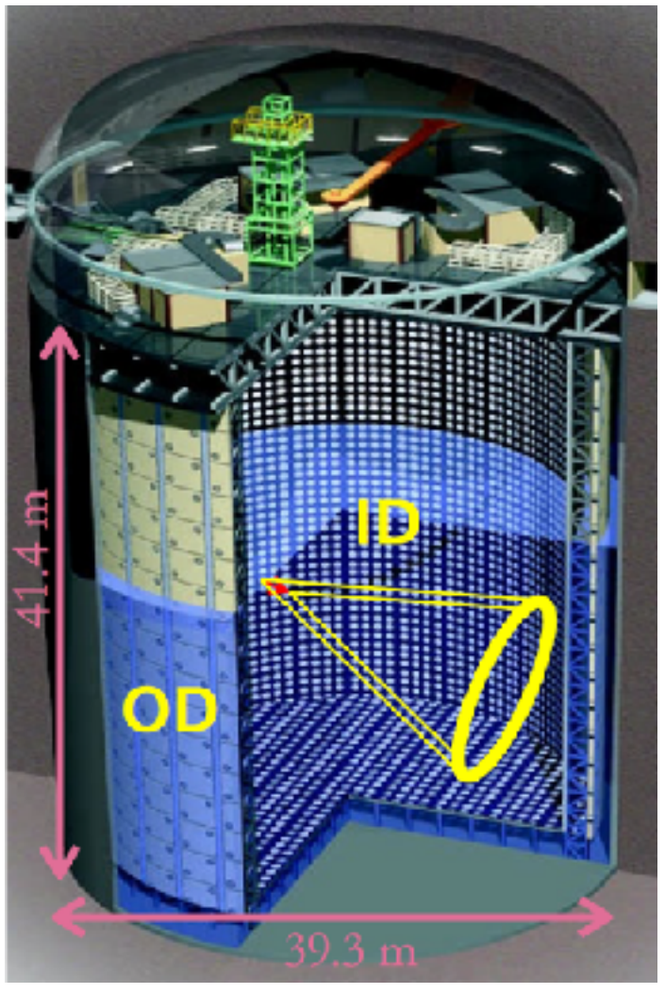
$$s_{ij} = \sin\theta_{ij} \qquad c_{ij} = \cos\theta_{ij} \qquad \Delta_{ij} = \Delta m_{ij}^2 L/4E_\nu$$

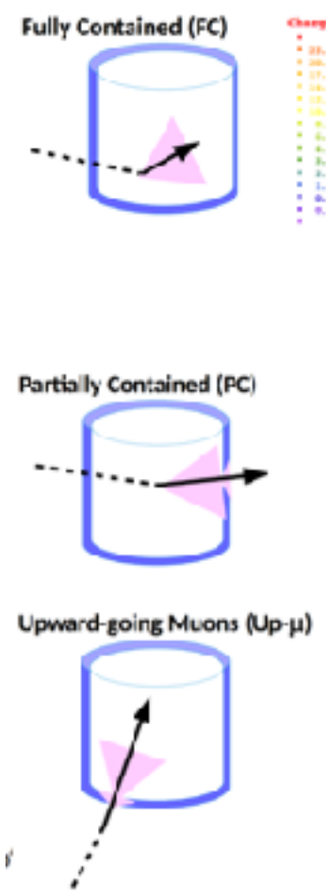
$$a = 2\sqrt{2}G_F n_e E_\nu = 7.56 \times 10^{-5}[\mathrm{eV}^2] \times \rho[\mathrm{g/cm}^3] \times E_\nu[\mathrm{GeV}]$$

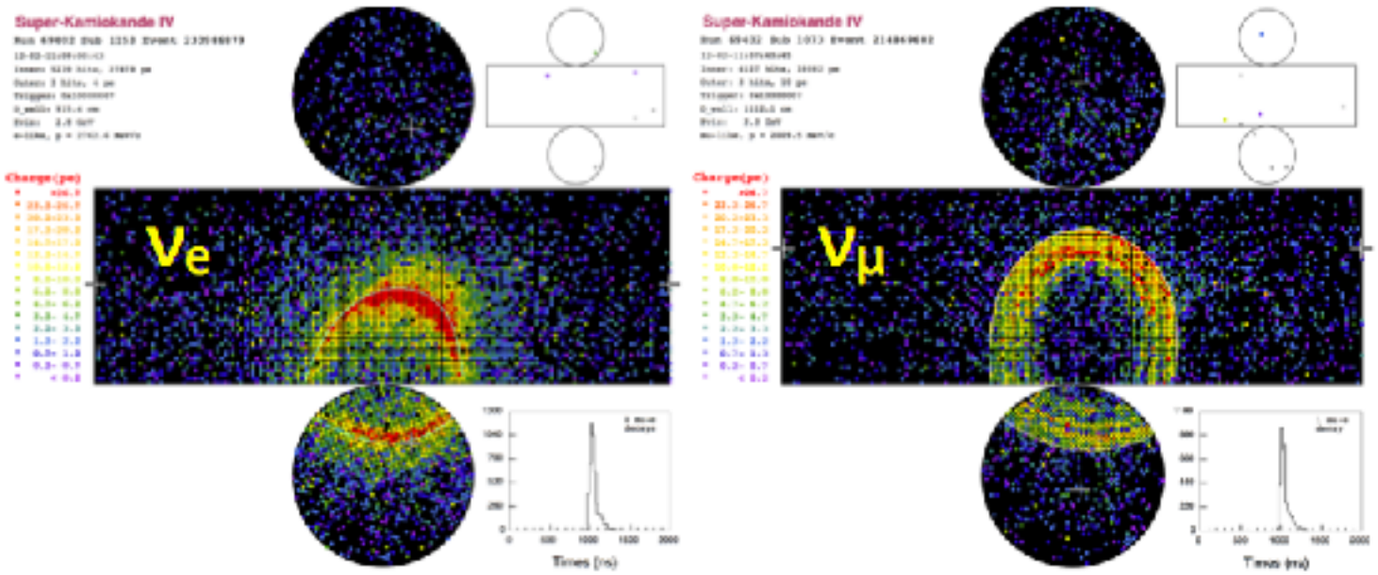
だいたい地中を1000km程度飛ばすと物質効果が効いてくる

質量階層構造の測定 1-1

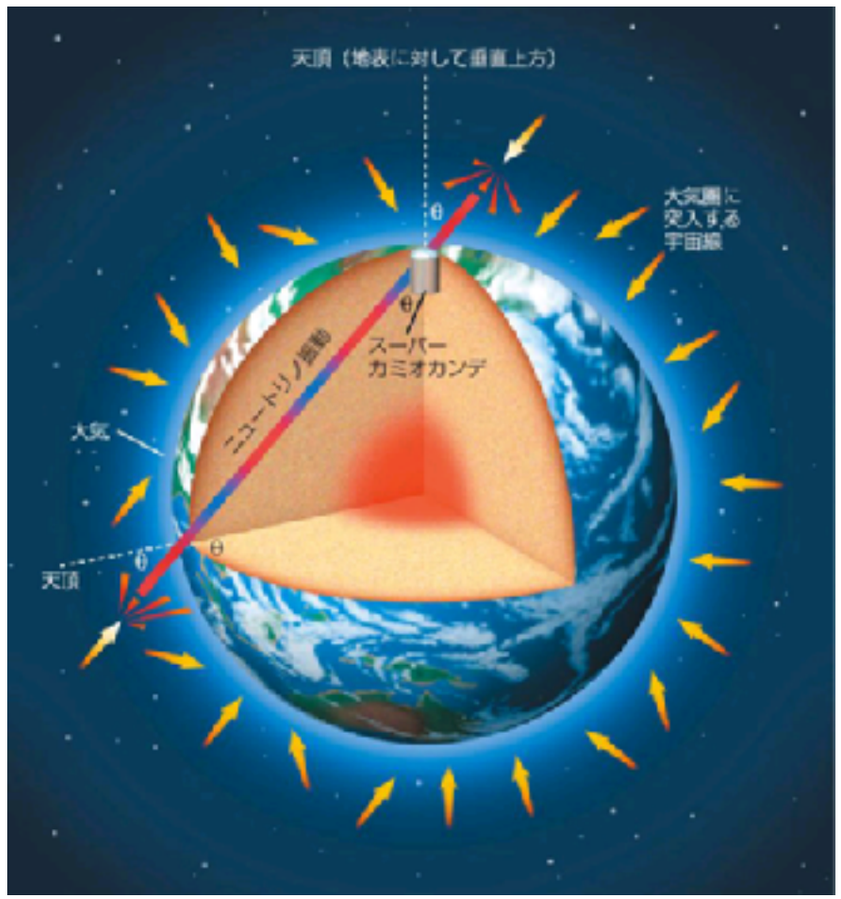
Super-Kamiokande





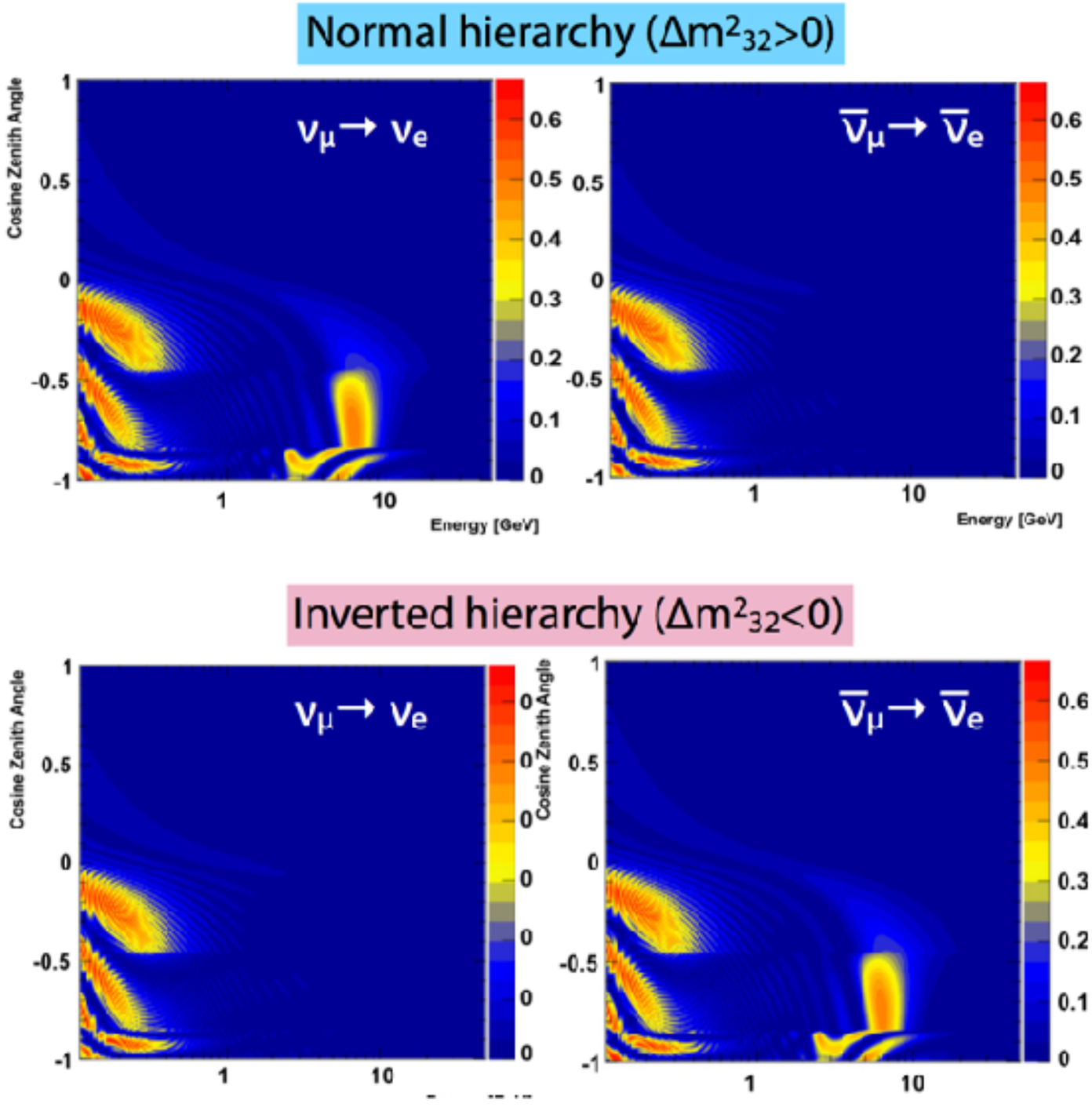


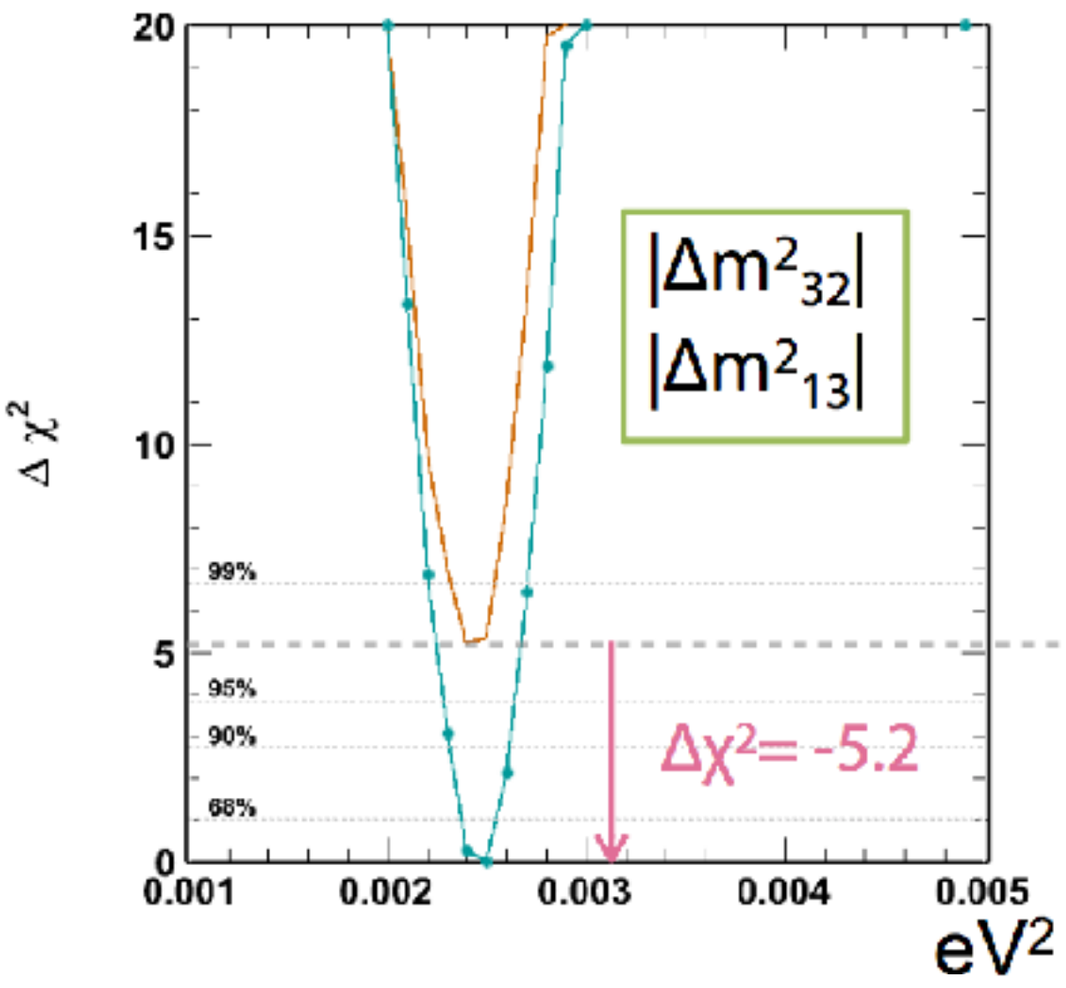
- 水チェレンコフ型検出器
- 50kton の超純水（有効体積22.5kton）
- 11,129本の20インチ光電子増倍管(ID)
- 1,885本の8インチ光電子増倍管(OD)



質量階層構造の測定 1-1

Super-Kamiokande





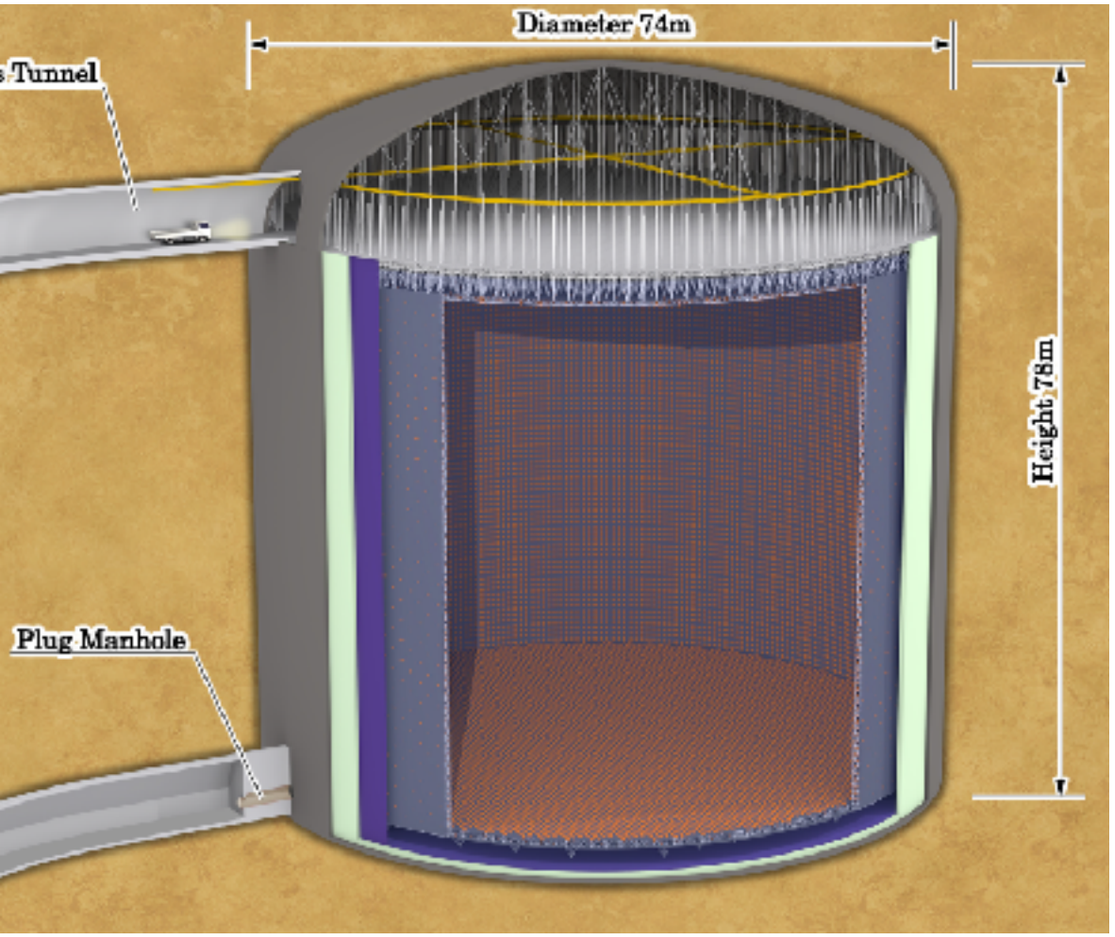
$(\Delta\chi^2 = \chi^2_{NH} - \chi^2_{IH} = -5.2)$

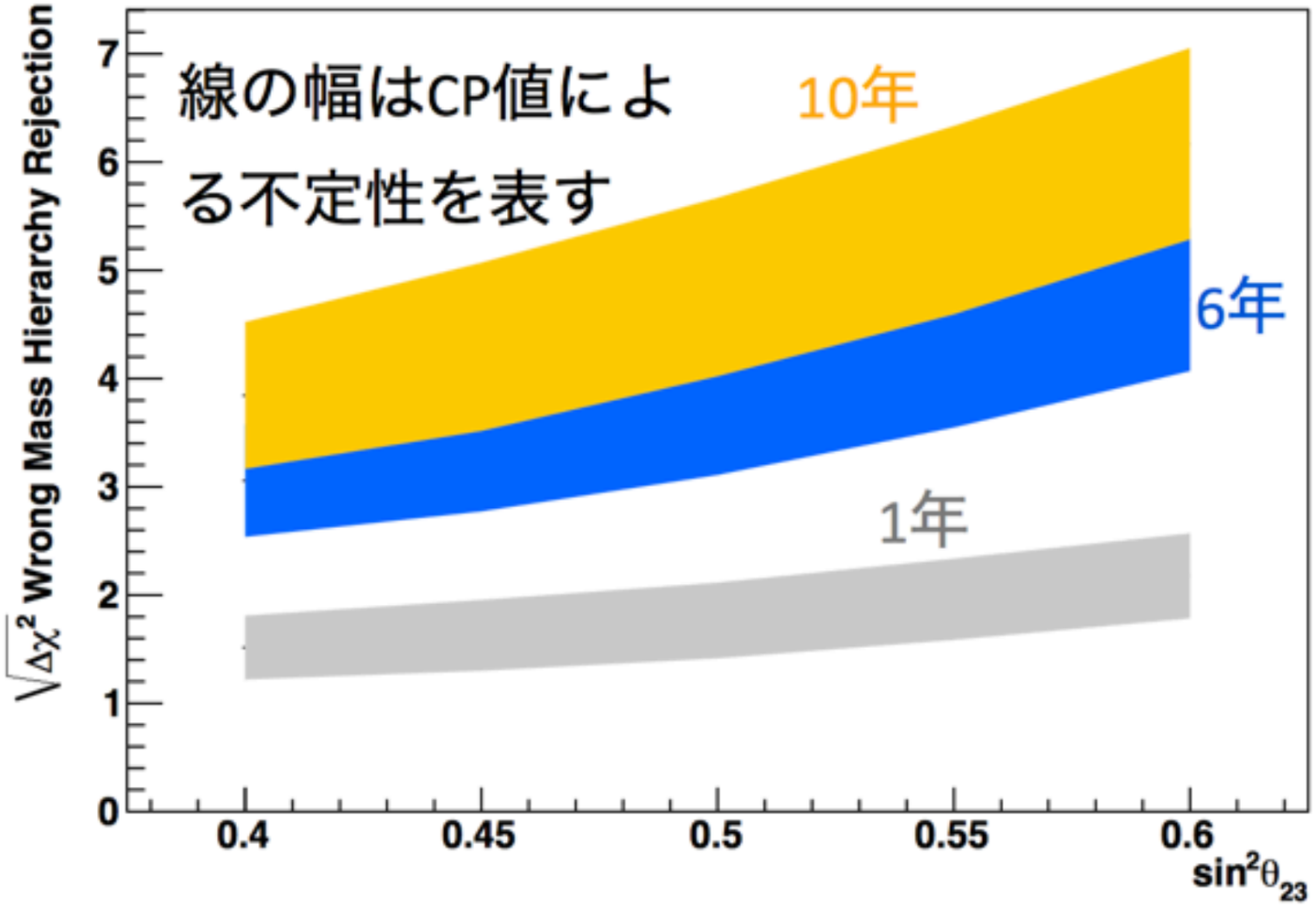
正常階層が優勢

（原子炉ニュートリノ実験+T2Kの制限も含む）

質量階層構造の測定 1-2

Hyper-Kamiokande

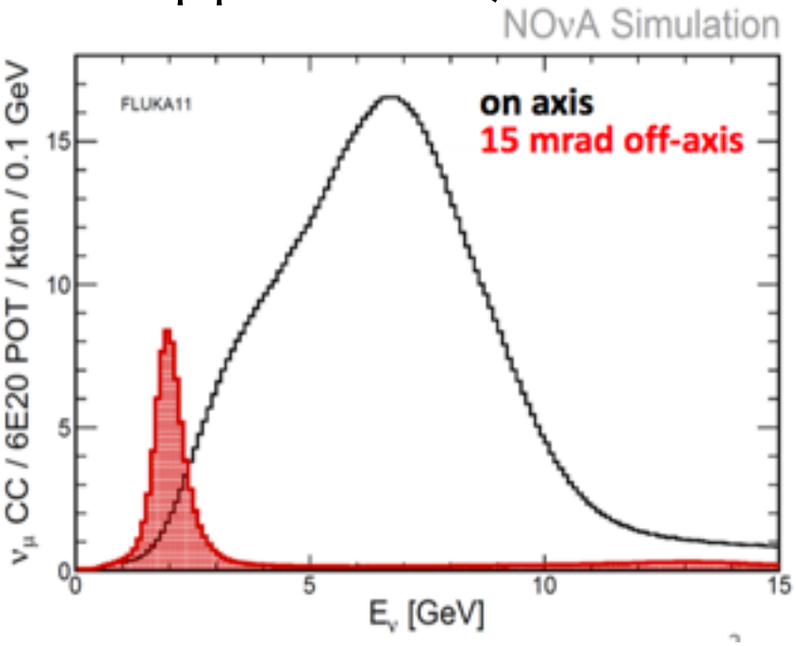


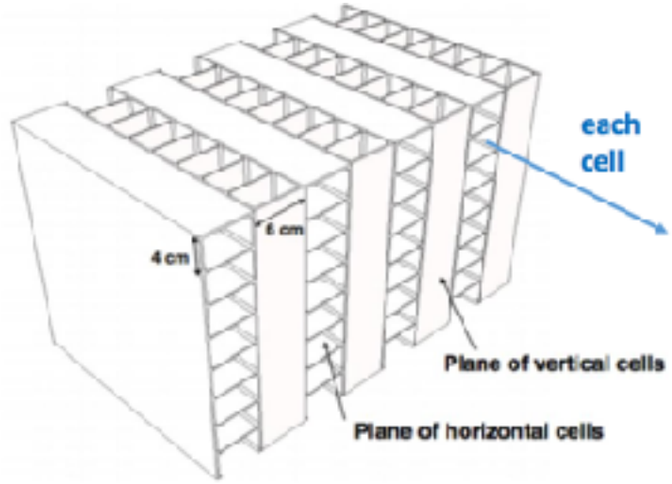


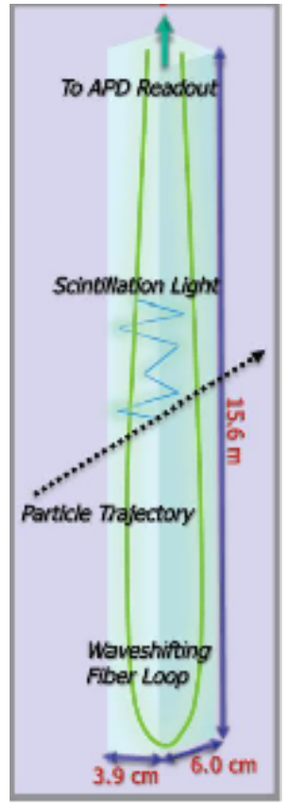
2018年度から建設予算が措置されれば、2026年から観測開始が可能

質量階層構造の測定 2

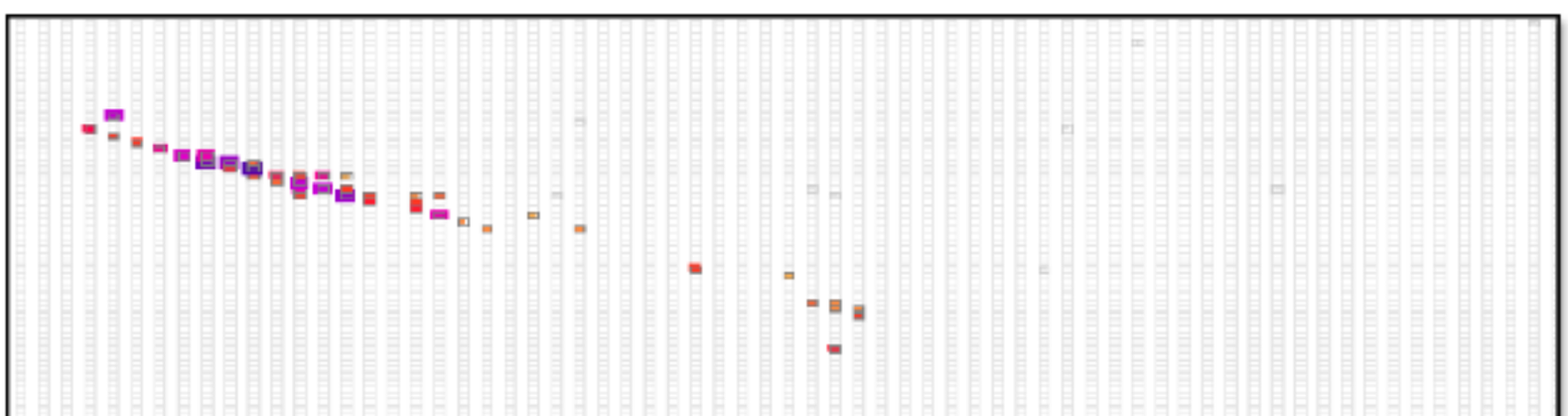
NOνA (NuMI Off-axis ν Appearance)





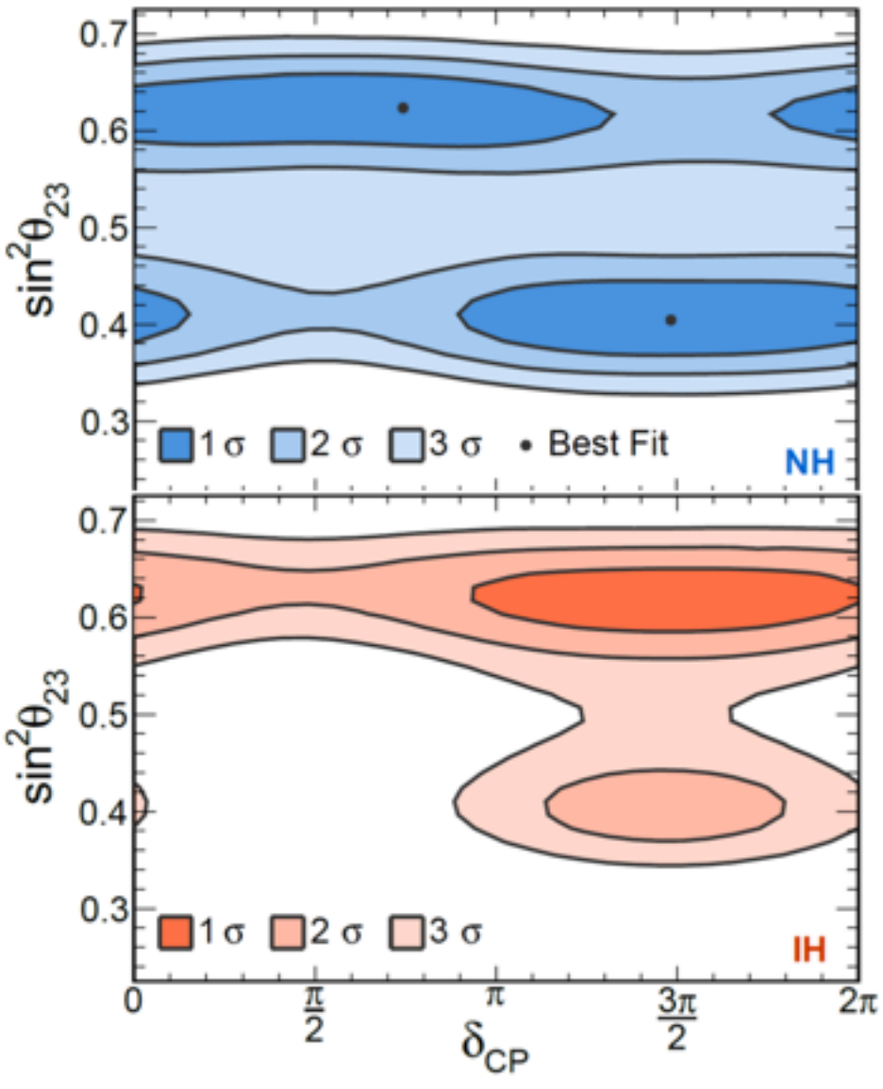


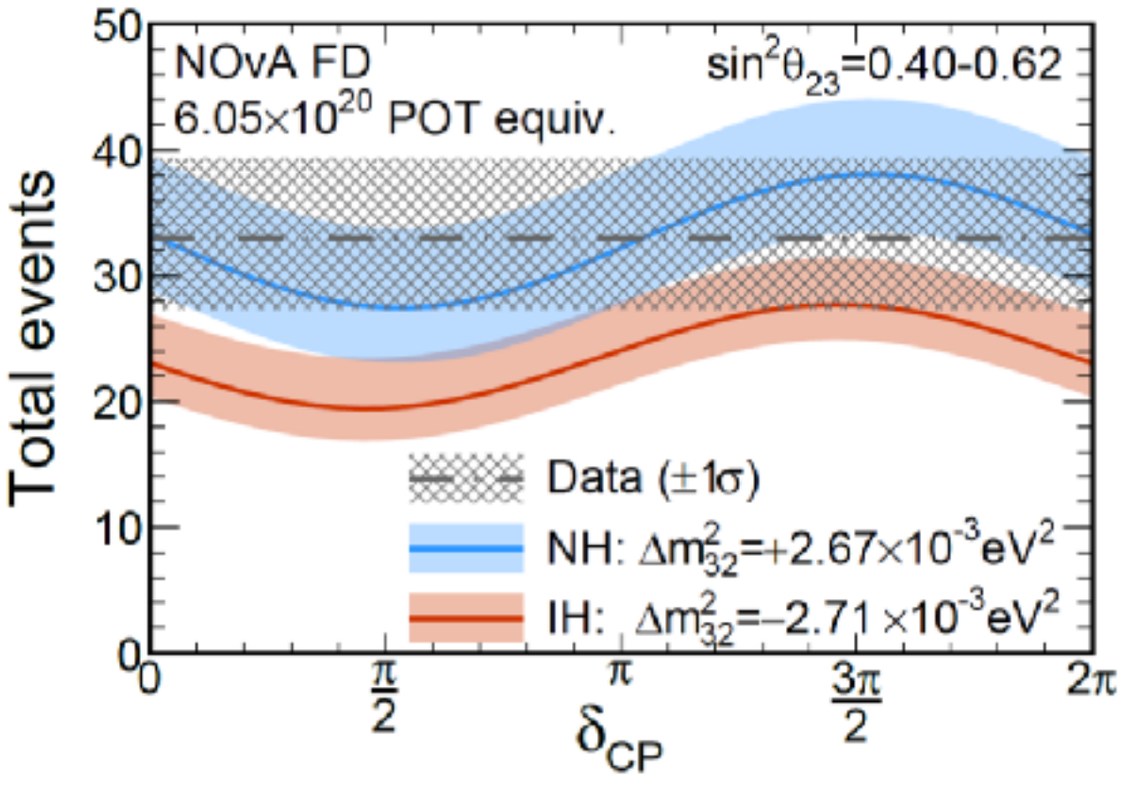
- Off axis ニュートリノビーム ($\nu_\mu/\overline{\nu_\mu}$)
- FNALから810kmに Far Detector (FD)
- FDは16m×16m×60mの大きさで14 ktom
- セルに分割された液体シンチレータによる発光
  + 波長変換ファイバー + APD(光検出器)



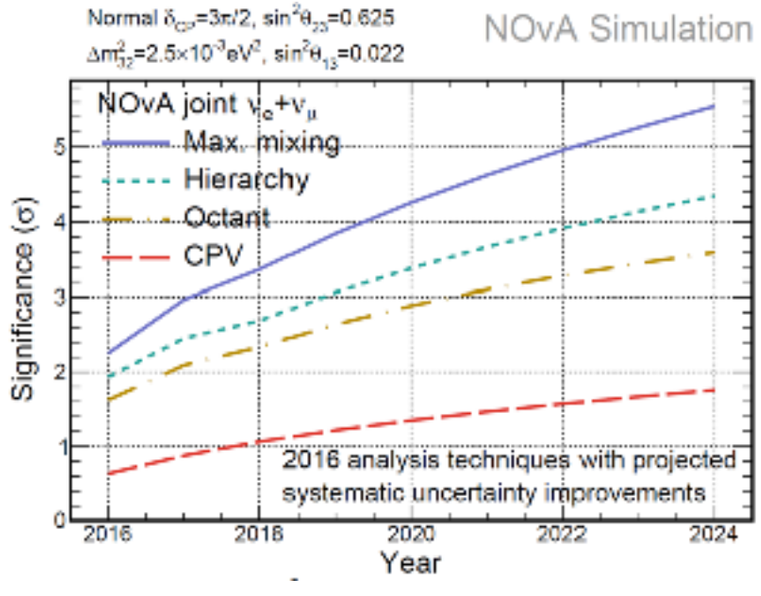
質量階層構造の測定 2

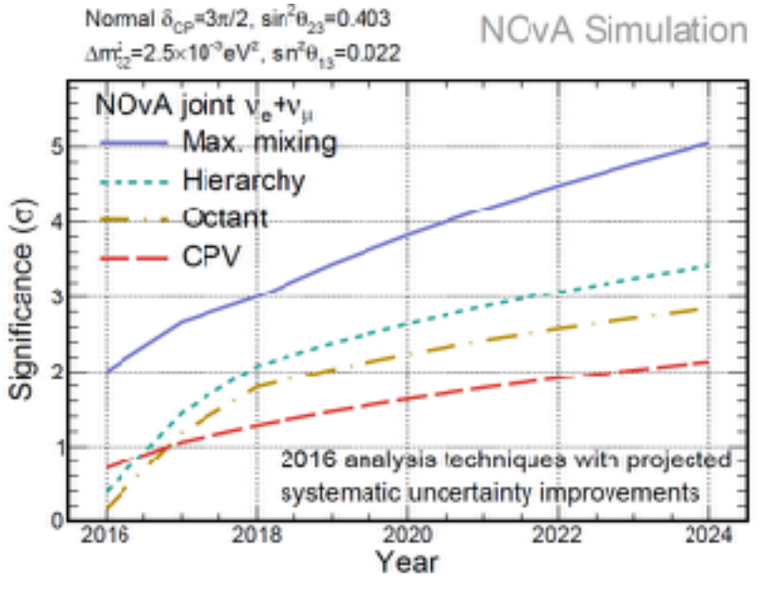
NOνA (NuMI Off-axis ν Appearance)





予測感度

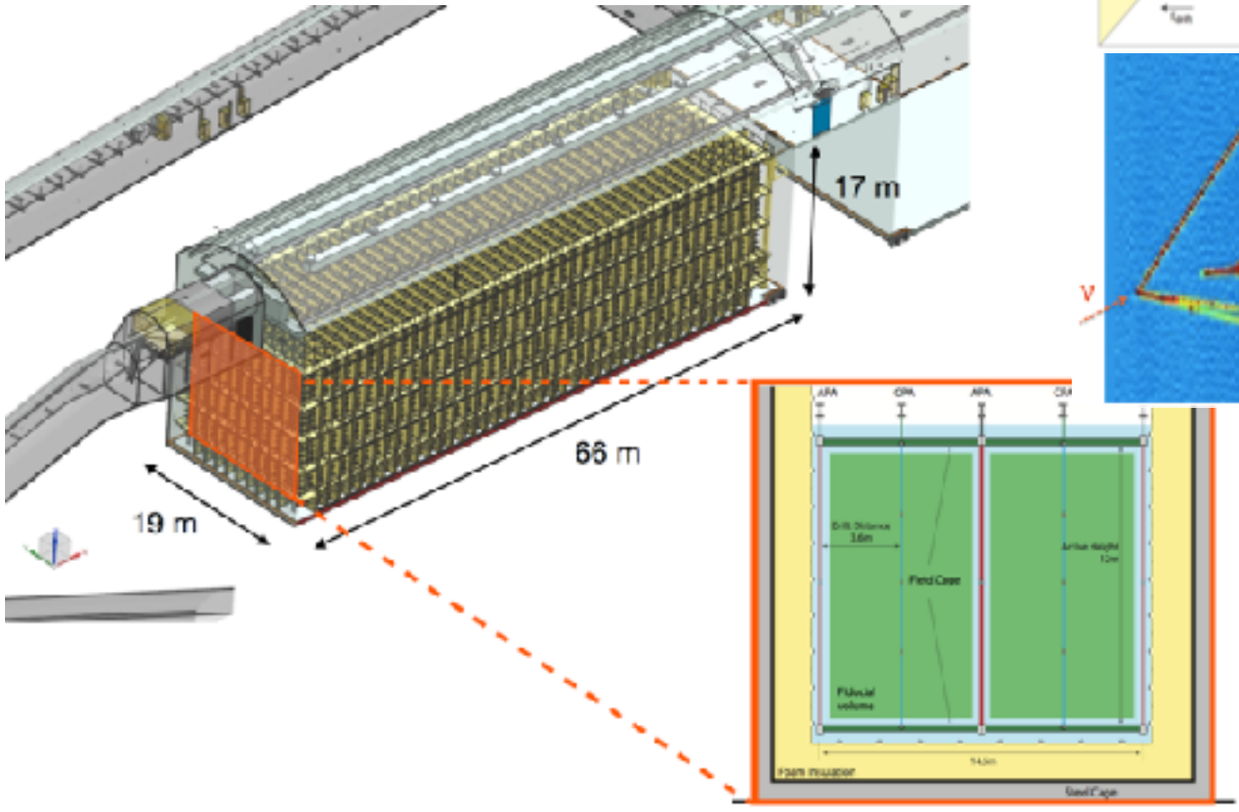


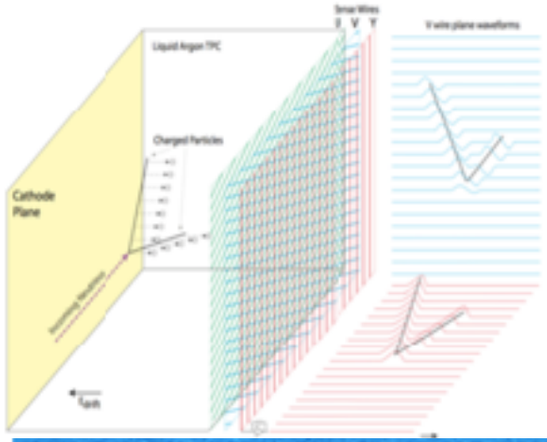


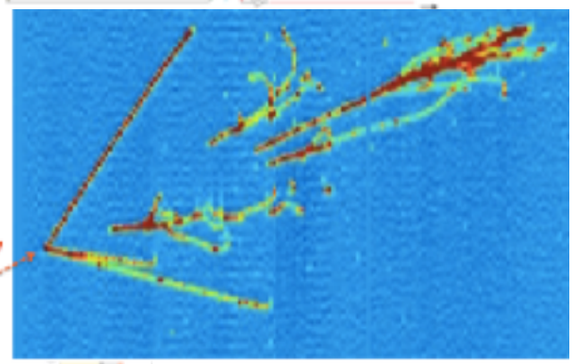
質量階層構造の測定 3

DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment)

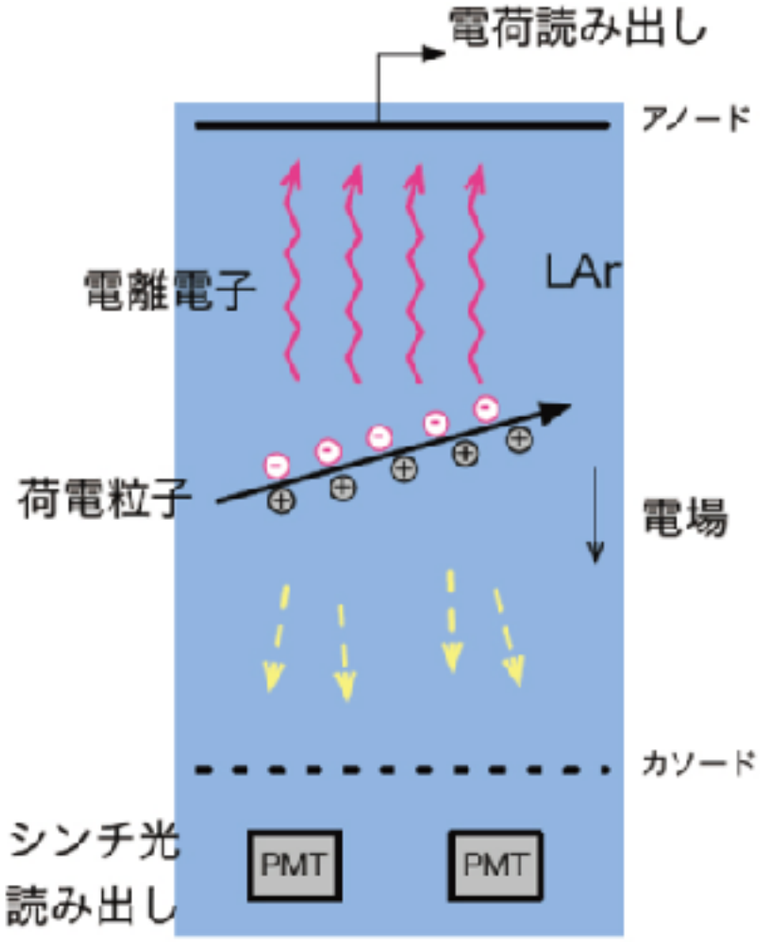
- On-axis ニュートリノビーム ($\nu_\mu/\overline{\nu_\mu}$)
- FNALから1300kmに Far Detector (FD)
- FDは液体アルゴンTPCで4×17 kton







<u>アルゴンTPCの例</u>



http://rd.kek.jp/project/LAr/index_j.html#genri

質量階層構造の測定 3

DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment)

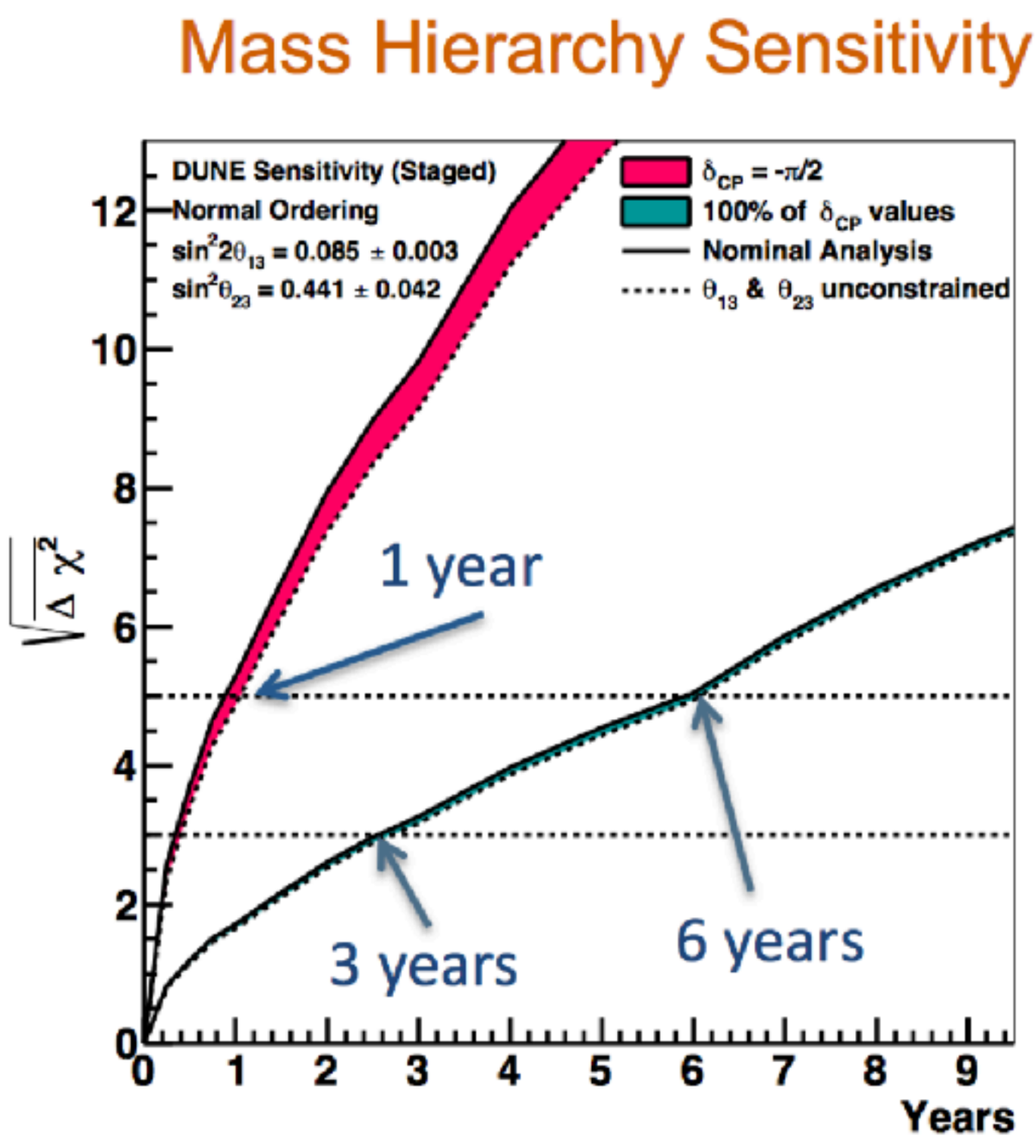
2017: Far Site Construction Begins

2018: protoDUNEs at CERN

2021: Far Detector Installation Begins

2024: Physics Data Begins

2026: Neutrino Beam Available



質量階層構造の測定 4

ニュートリノ振動 (電子ニュートリノ生存確率)

$$P_{ee}(L/E) = 1 - P_{21} - P_{31} - P_{32}$$

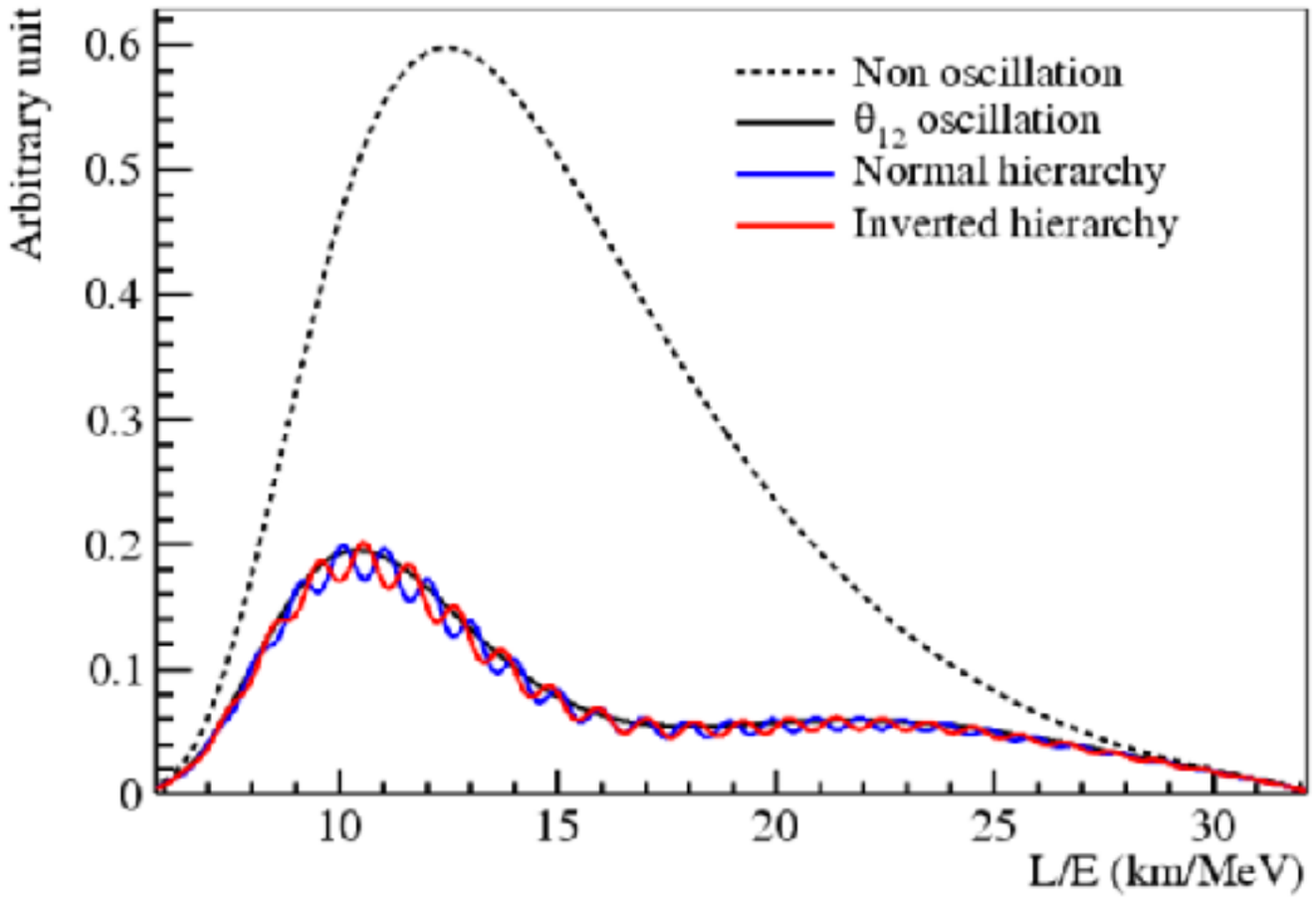
$$P_{21} = \cos^4(\theta_{13})\sin^2(2\theta_{12})\sin^2(\Delta_{21})$$

$$P_{31} = \cos^2(\theta_{12})\sin^2(2\theta_{13})\sin^2(\Delta_{31})$$

$$P_{32} = \sin^2(\theta_{12})\sin^2(2\theta_{13})\sin^2(\Delta_{32}),$$

$$\Delta_{ij} = 1.27\Delta m^2_{ij} L/E$$

$$\Delta m^2_{ij} = (m^2_i - m^2_j)$$

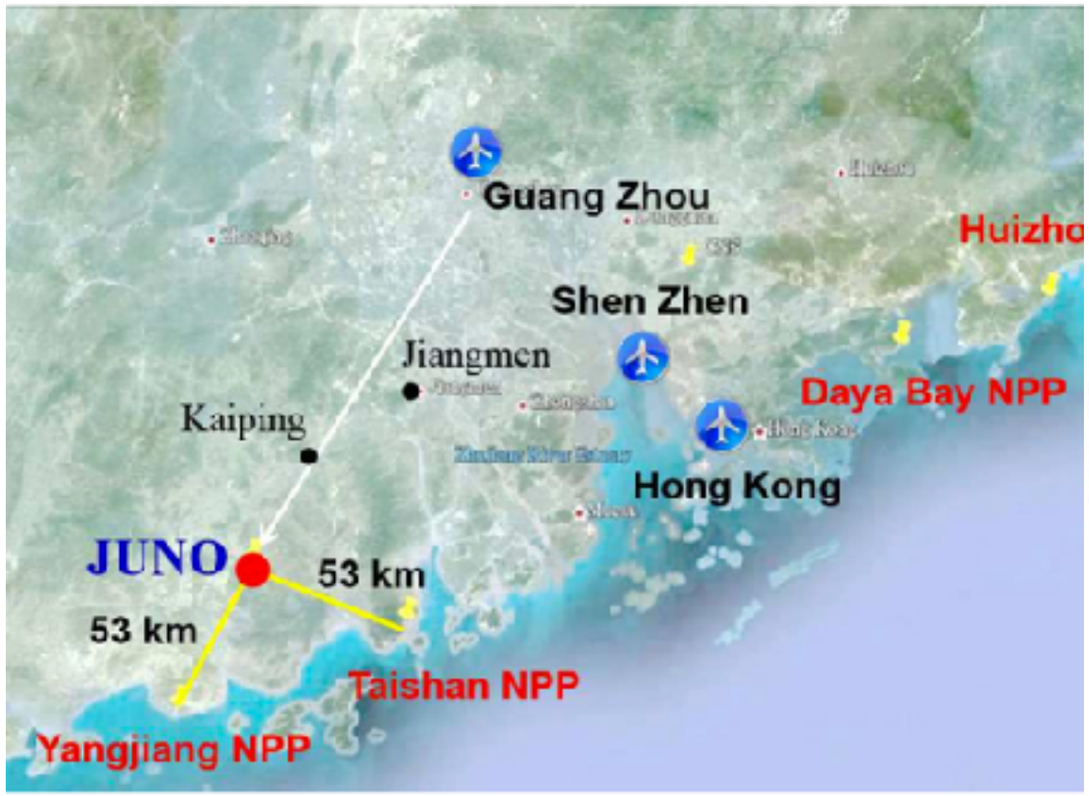


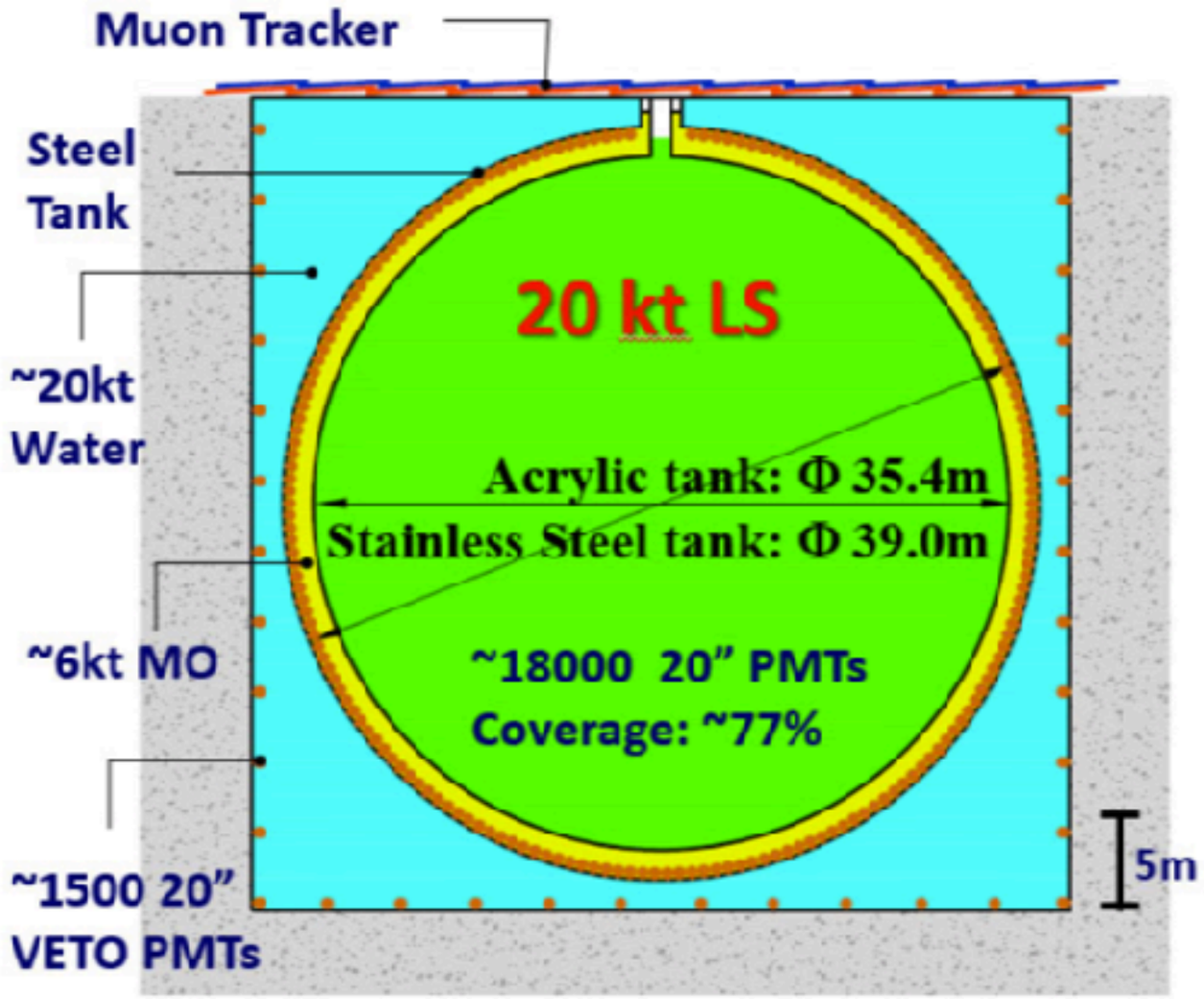
60kmの距離にある原子炉から
反電子ニュートリノが飛来したと仮定
した時のL/Eのスペクトル

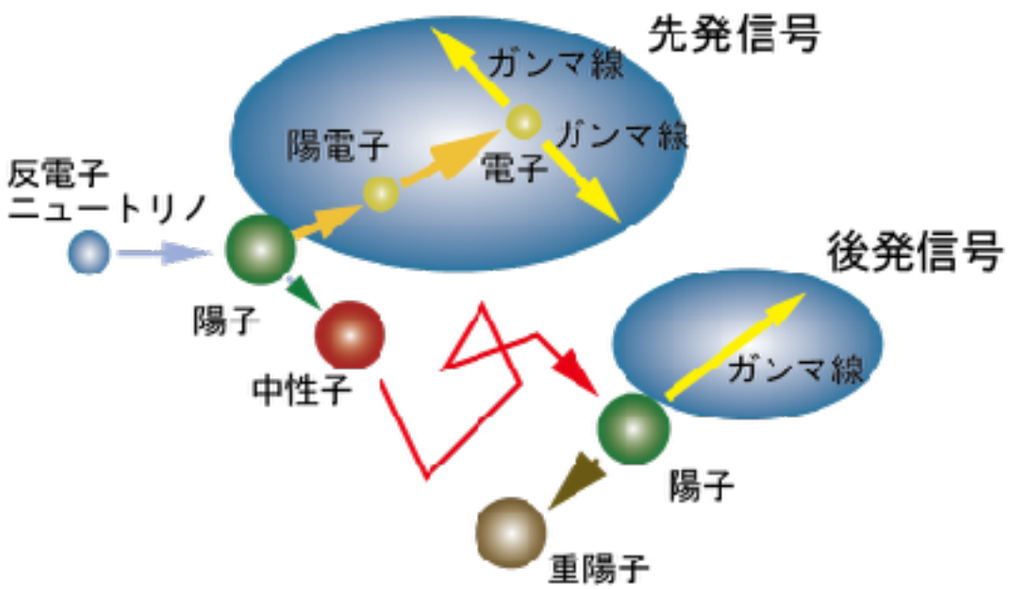
PRD 78, 111103(R) (2008)

質量階層構造の測定 4

JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory)





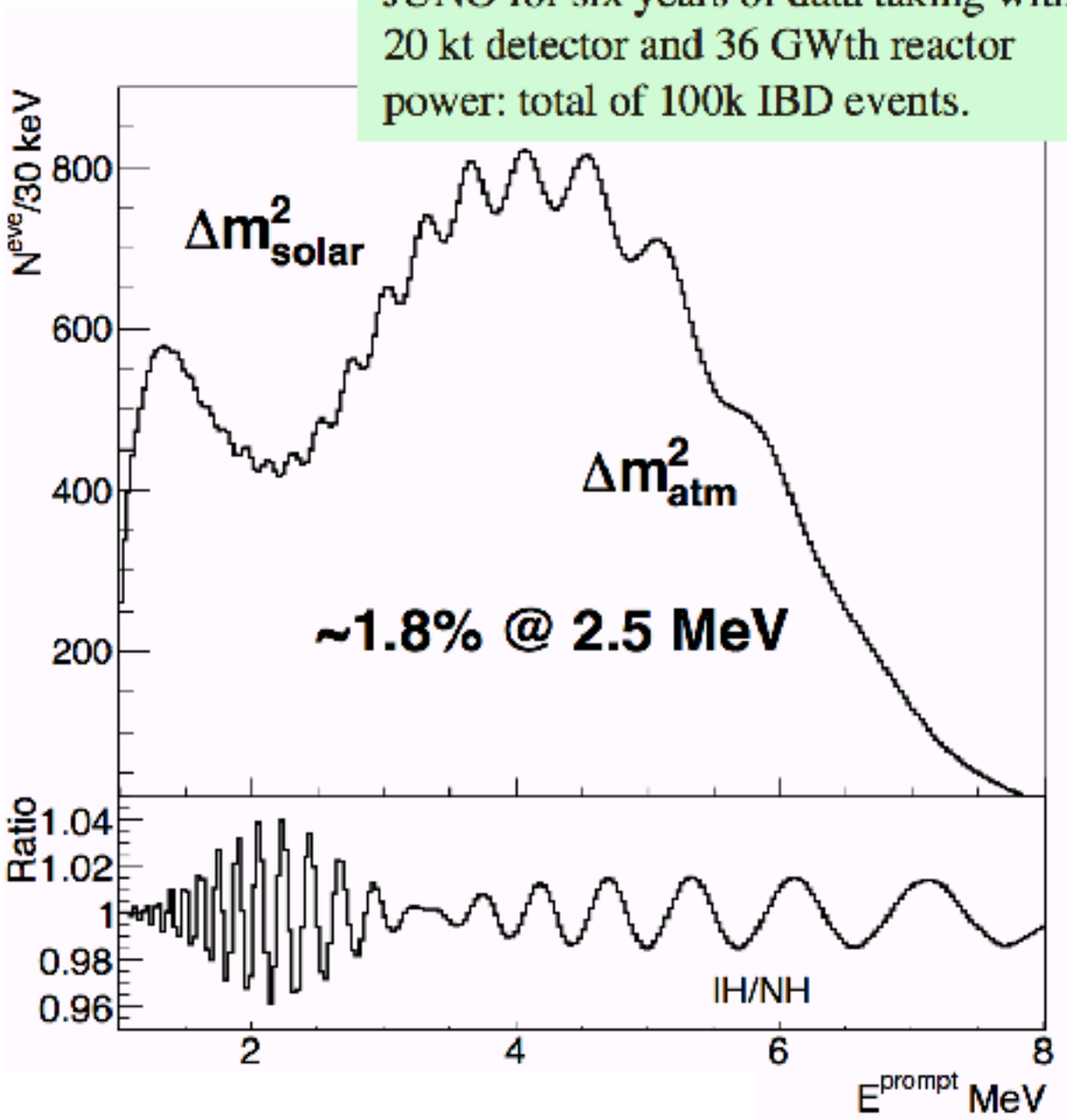


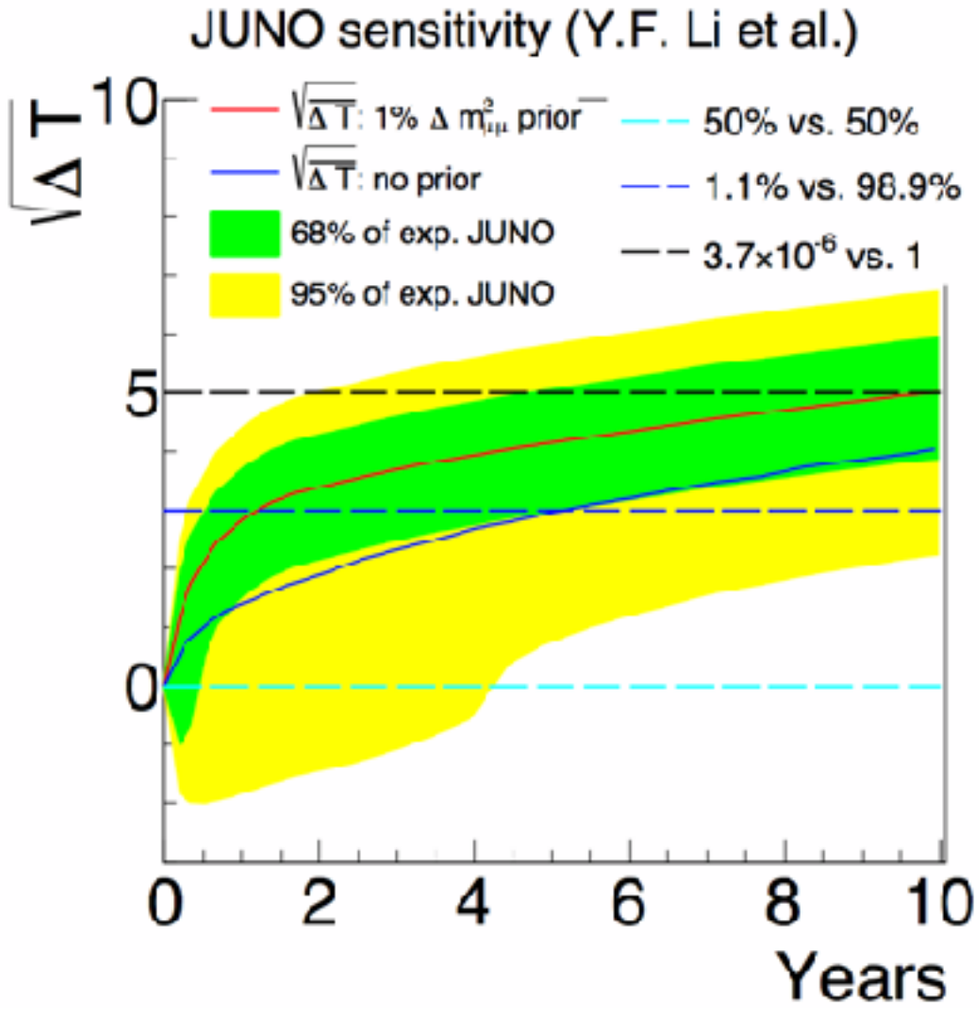
- 20 kton の液体シンチレータ
- 反電子ニュートリノの特定はカムランドと同じ
- 1,850m の水相当深さ

質量階層構造の測定 4

JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory)

Expected prompt energy spectrum at JUNO for six years of data taking with 20 kt detector and 36 GWth reactor power: total of 100k IBD events.



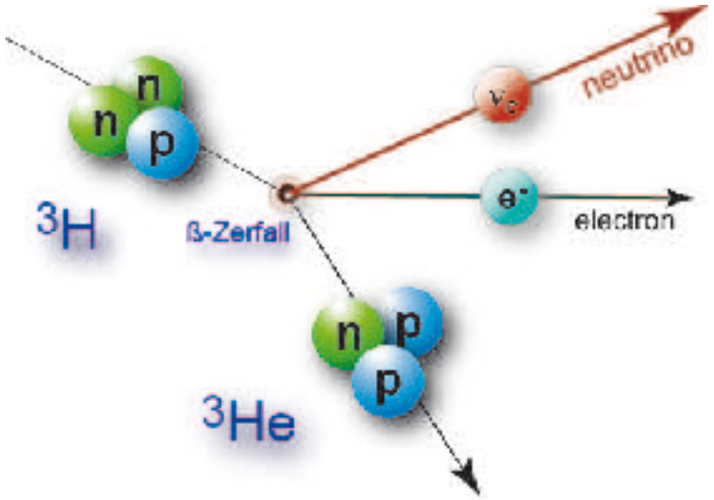


-Civil preparation: 2013-2014
-Civil construction:2014-2017
-Detector component production: 2016-2017
-PMT production: 2016-2019
-Detector assembly & installation: 2018-2019
-Filling & data taking: 2020

質量絶対値の直接測定

質量絶対値の直接測定（ベータ崩壊）

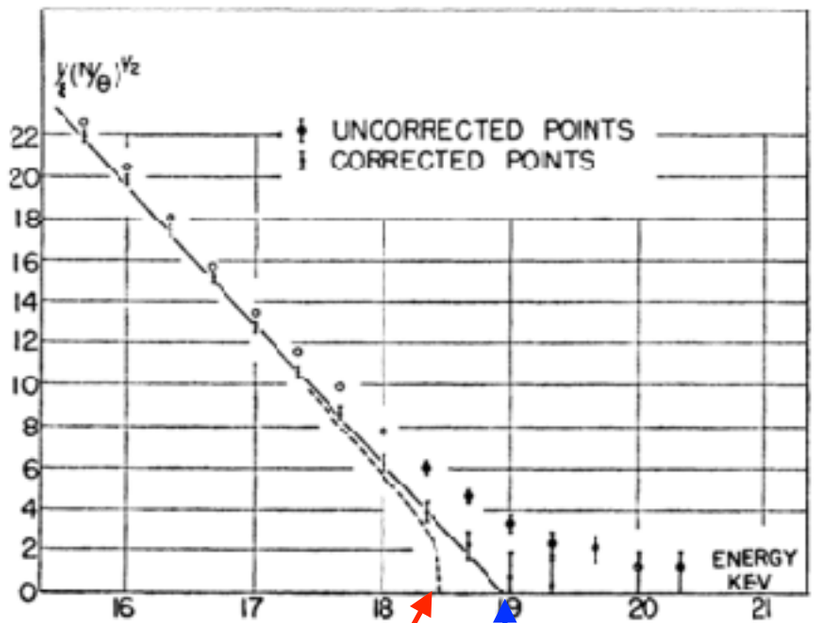
ベータ崩壊のエネルギースペクトル測定



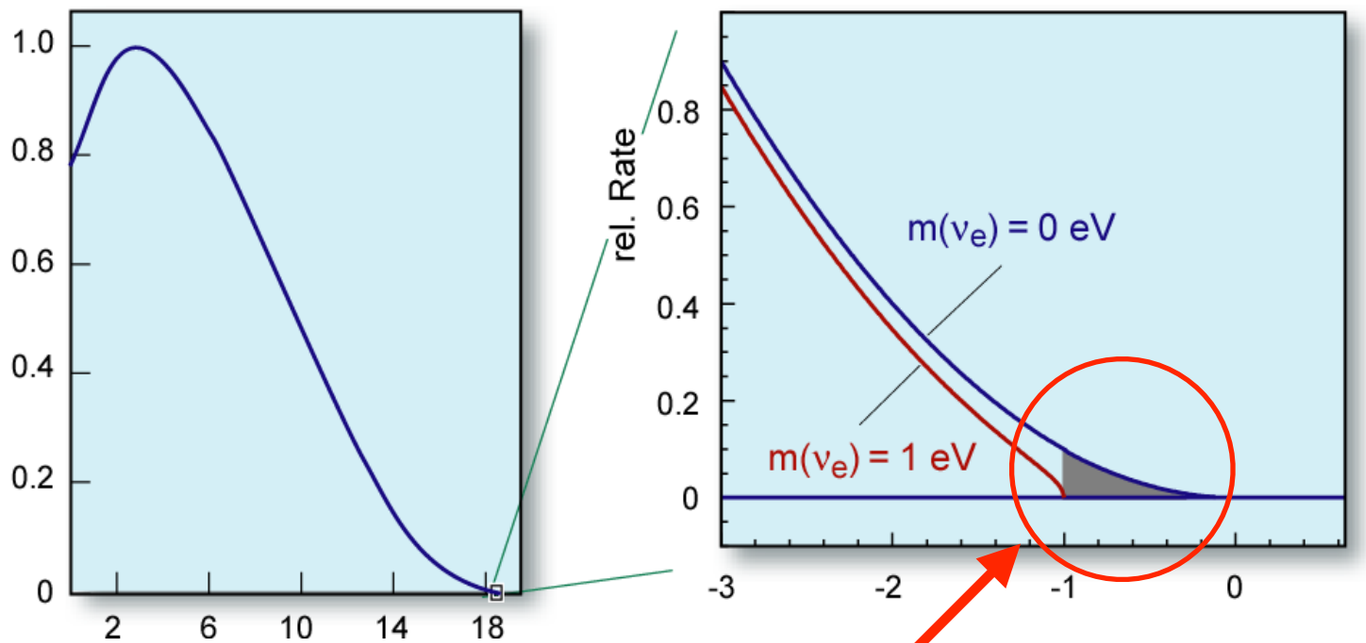
運動学だけを使ってスペクトルの末端部分の
形状変化から質量を求める

$$\frac{dN}{dE_e} = C \cdot F(E,Z) \cdot P_e \cdot (E_e + m_e c^2) \cdot (E_o - E_e) \sqrt{(E_o - E_e)^2 - m_{\nu_e}{}^2}$$

G.C.Hanna and B.Pontecorvo (1949)



$m_\nu \neq 0$　$m_\nu = 0$



スペクトルの末端 1eV は全崩壊の2×10^{-13}だけ

質量絶対値の直接測定（ベータ崩壊）

必要な条件

使用する原子核

・低いエネルギー

・高統計

^{3}H : (18.6keV, 12.3年, ベータ崩壊)

エネルギー低い

比較的一般的で使用されている

崩壊先の準位が１つだけ

^{163}Ho : (2.55keV, 4570年, 電子吸収)

エネルギーとっても低い

半減期は長め

^{187}Re : (2.47keV, 4.1×10^{10}年, ベータ崩壊)

エネルギーとっても低い

半減期が長すぎる

検出器

・高いエネルギー分解能力

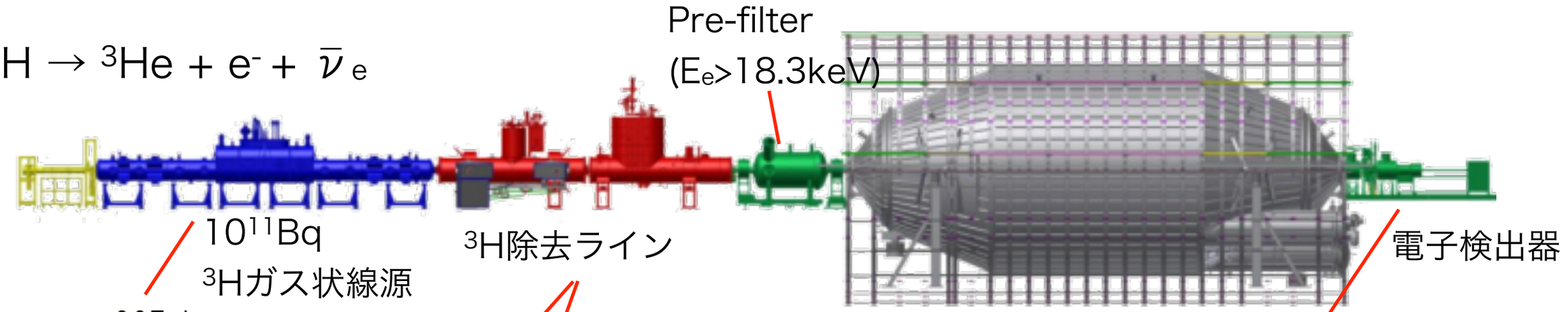
・電子を検出するまでエネルギーロスが少ない

（崩壊核の密度を小さくする etc.）

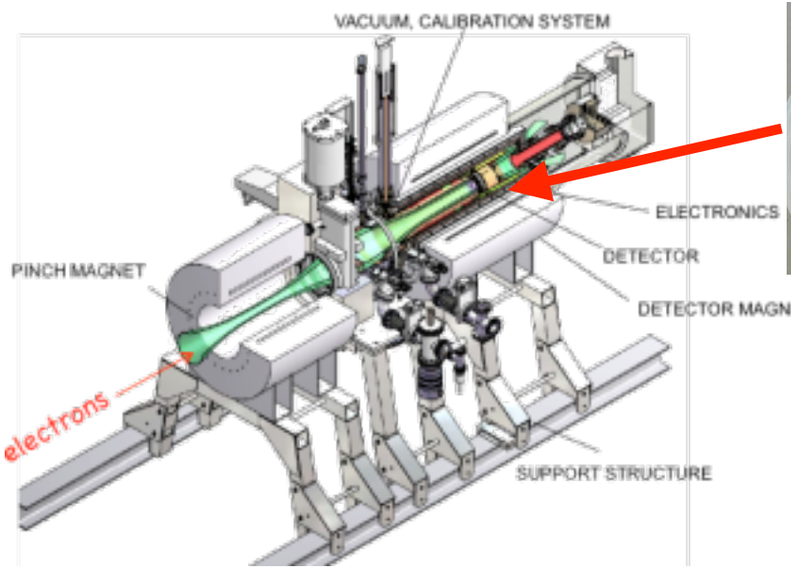
質量絶対値の直接測定（ベータ崩壊１）

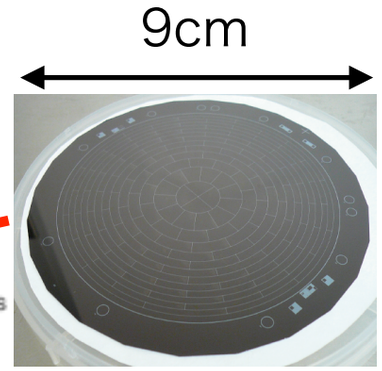
KATRIN (KArlsruhe TRItium Neutrino Experiment)

$^3H \rightarrow {}^3He + e^- + \bar{\nu}_e$



0.93eV分解能エネルギーフィルタ
(MAC-E filter)





148 pixel
Si PIN diode

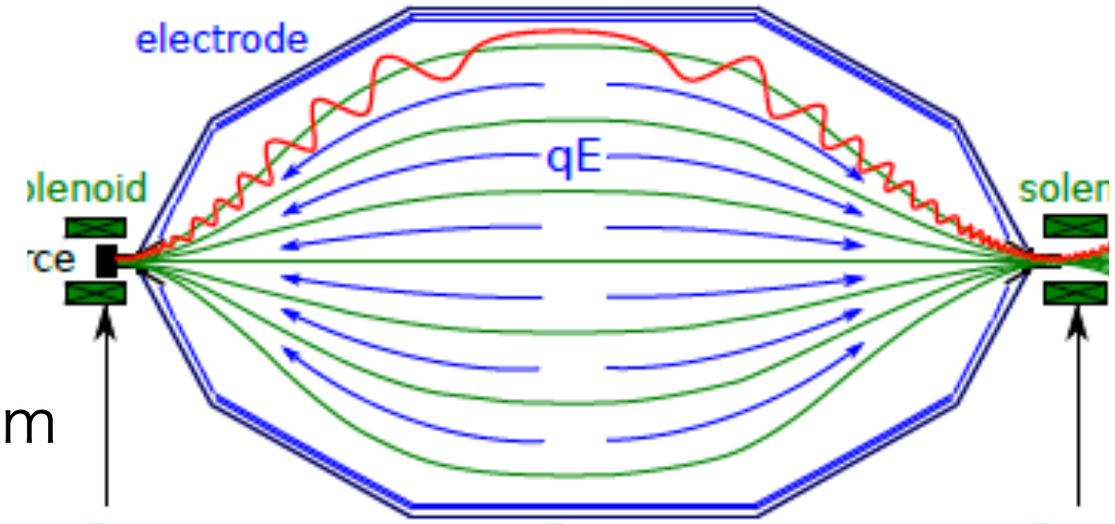
電子は磁場によってガイドされる
トリチウムの残存は10^{-14} まで低下

検出器は検出した電子数を数えるだけで、
エネルギー情報は使わない

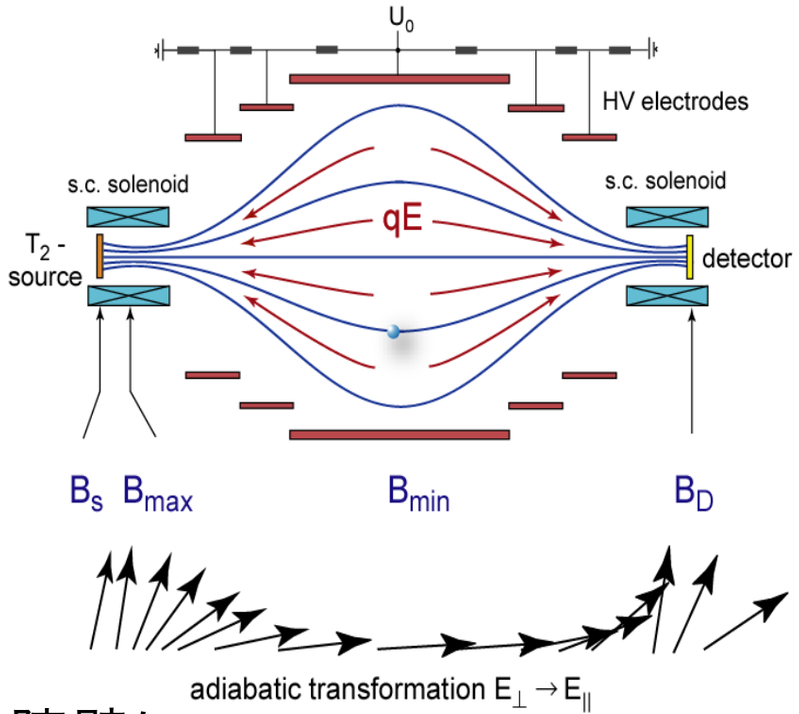
質量絶対値の直接測定（ベータ崩壊１）

KATRIN (KArlsruhe TRItium Neutrino Experiment)

MAC-E Filter (Magnetic Adiabatic Collimation combined with an Electrostatic Filter)



ϕ10m×20m



- 磁場で断熱的に誘導しながら精密な静電ポテンシャル障壁に垂直に当てて、この障壁を越えて来た電子を数える。
- 障壁電位は変化させて、あるエネルギー以上の電子だけがMAC-E filter を超えるようにする。
  例えば $E_e > 18.31$を数分測定して, 次に$E_e > 18.32$, など
  （生データは積分値）

$$\Delta E = E \cdot B_{min} / B_{MAX}$$
$$= E \cdot 1 / 20000$$
$$= 0.93\text{eV} @ 19.6\text{keV}$$

感度：200 meV (90%CL)
発見能力：350 meV @ 5σ
2018年開始予定

質量絶対値の直接測定（ベータ崩壊１）

KATRIN (KArlsruhe TRItium Neutrino Experiment)

MAC-E Filter (Magnetic Adiabatic Collimation combined with an Electrostatic Filter)

使用場所

製作場所

質量絶対値の直接測定（ベータ崩壊１）

KATRIN (KArlsruhe TRItium Neutrino Experi

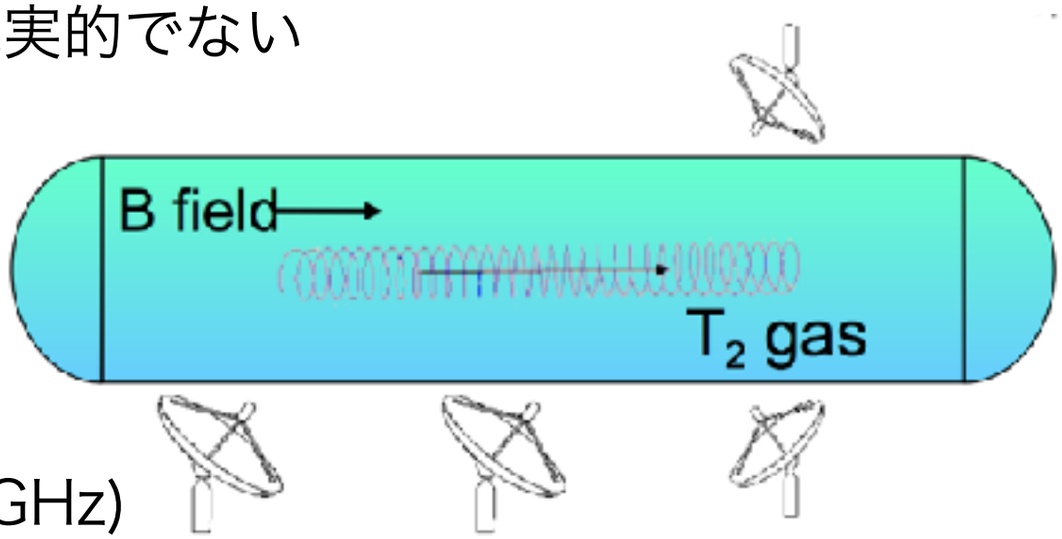
MAC-E Filter (Magnetic Adiabatic Collimation combi

質量絶対値の直接測定（ベータ崩壊２）

Project 8

$^3H \rightarrow {}^3He + e^- + \bar{\nu}_e$

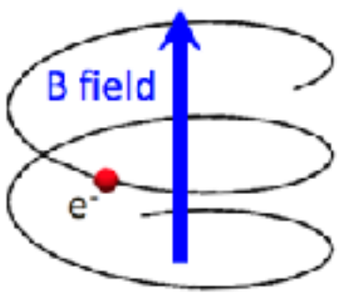
- KATRIN のガス線源の密度はもう大きくできない。
- サイズを大きくしても MAC-E Filter ϕ100m は現実的でない



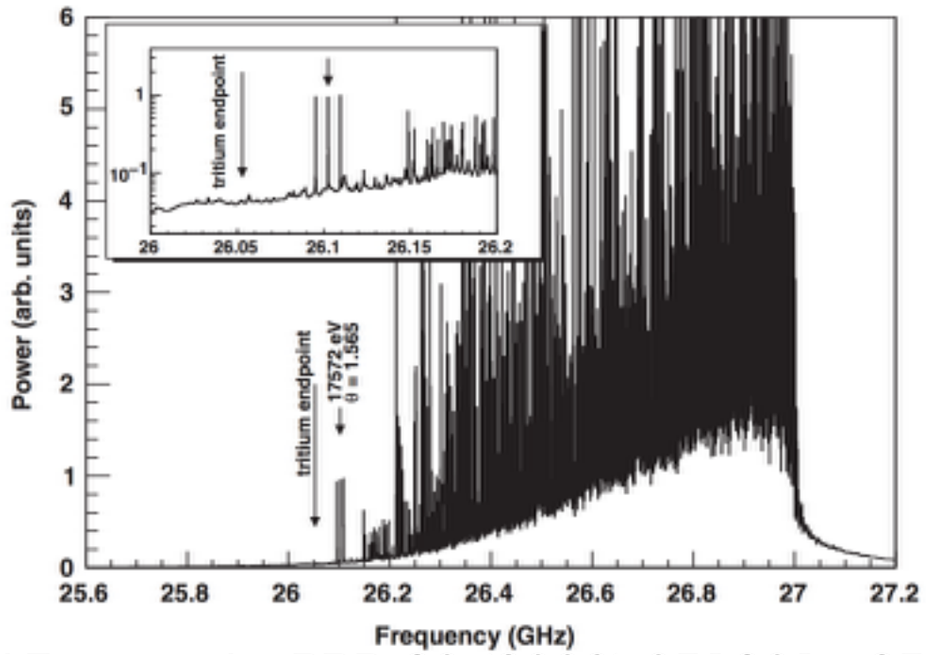
- トリチウムガス線源に一様磁場
- βからのコヒーレントサイクロトロン放射
- この放射(マイクロ波)は線源中を通り抜けて外部へ
- アンテナアレイでマイクロ波を検出(25GHz~26.gGHz)
- 高いエネルギー分解能

Frequency of cyclotron radiation related to energy of electrons:

$$f_c = \frac{1}{2\pi}\frac{eB}{(m + E_{kin})}$$



- f_c = 25 – 26.5 GHz cyclotron frequency range in Project 8
  - B = 0.9459 T magnetic field
  - E_{kin} = 0 – 30 keV for ^{83m}Kr conversion electrons
- 1 fW of radiated power at 18 keV (tritium endpoint)



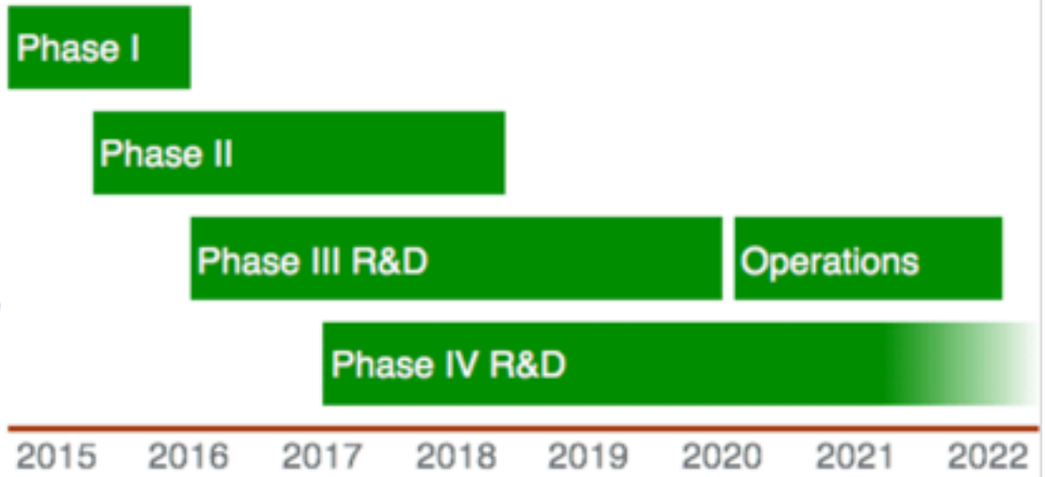
B. Monreal and J.Formaggio, PRD 80 (2009) 051301

質量絶対値の直接測定（ベータ崩壊２）

Project 8

A phased tritium beta endpoint experiment to measure the electron neutrino mass

- **Phase I (Complete)**
  - First demonstration of CRES technique with ^{83m}Kr
- **Phase II (2015-2018)**
  - First tritium measurement with CRES
  - Endpoint determination to ~30 eV
  - *see also Mathieu Guigue, Thurs. parallel*
- **Phase III (2016-2022)**
  - CRES demonstration in 200 cm^3 free space volume
  - Neutrino mass sensitivity of ~2 eV
- **Phase IV (2017+)**
  - Atomic tritium endpoint measurement with m_ν ~ 40 meV projected sensitivity



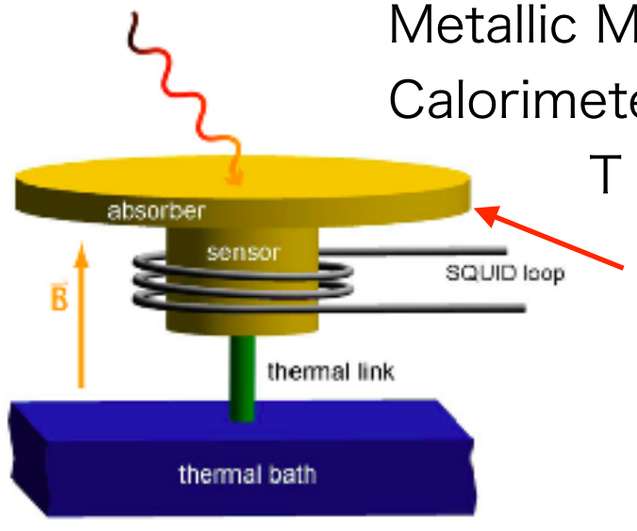
質量絶対値の直接測定（電子吸収）

ECHo (Electron Capture ^{163}Holmium experiment)

$$^{163}_{67}\mathrm{Ho} \rightarrow ^{163}_{66}\mathrm{Dy}^{*} + \nu_e$$

$$^{163}_{66}\mathrm{Dy}^{*} \rightarrow ^{163}_{66}\mathrm{Dy} + E_C$$

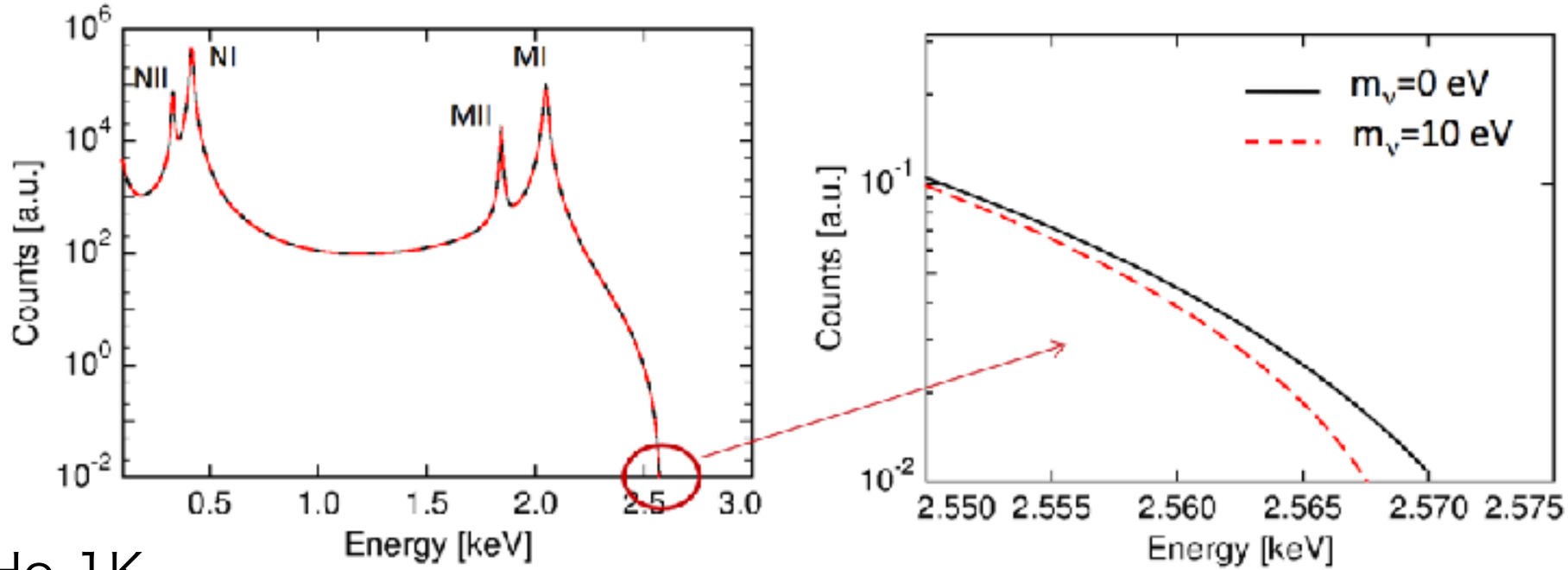
- $Q_{EC} \cong 2.5$ keV
- $\tau_{1/2} \cong 4570$ years



Metallic Magnetic Calorimeters(MMC)

T ~ 10mK

Source inside



ECHo-1K

- 原子炉で製作された1000Bqの^{163}Hoを使用
- 1年10^{10}カウントで $m_\nu < 10$ eV （将来的にECHo-1Mで < 1eV）
- 2017年８月にデータ収集開始予定

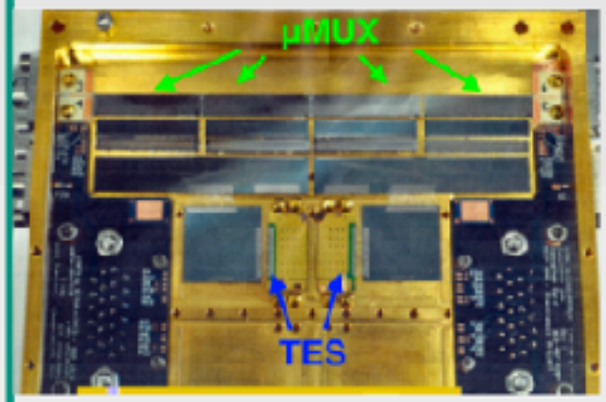
質量絶対値の直接測定（電子吸収）

^{163}Ho を使った他の実験

HOLMES

France, Switzerland

- technology: TES



pixel test

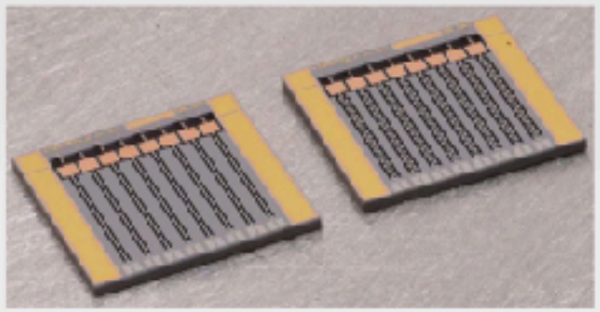
ΔE~7 eV
@6keV

now:
- producing source:
  radiochemical + mass separation
- TES + source implantation
- 32 px x 300 Bq in 2017
  → 10 eV limit in 1 month

2018: 64 px x 300 Bq x 16 det

NuMECS

- technology: TES



- sensitivity: only R&D

質量絶対値の直接測定（ニュートリノ吸収）

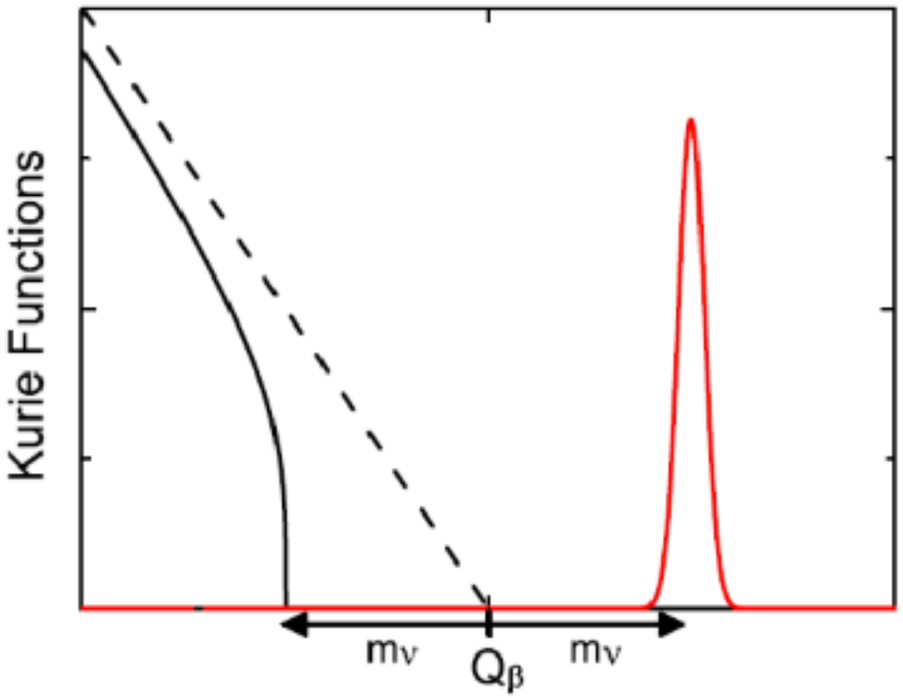
PTOLEMY (Princeton Tritium Observatory for Light, Early-Universe, Massive-Neutrino Yield)

$$\nu_e + \mathcal{N}(A,Z) \rightarrow \mathcal{N}'(A,Z+1) + e^-$$

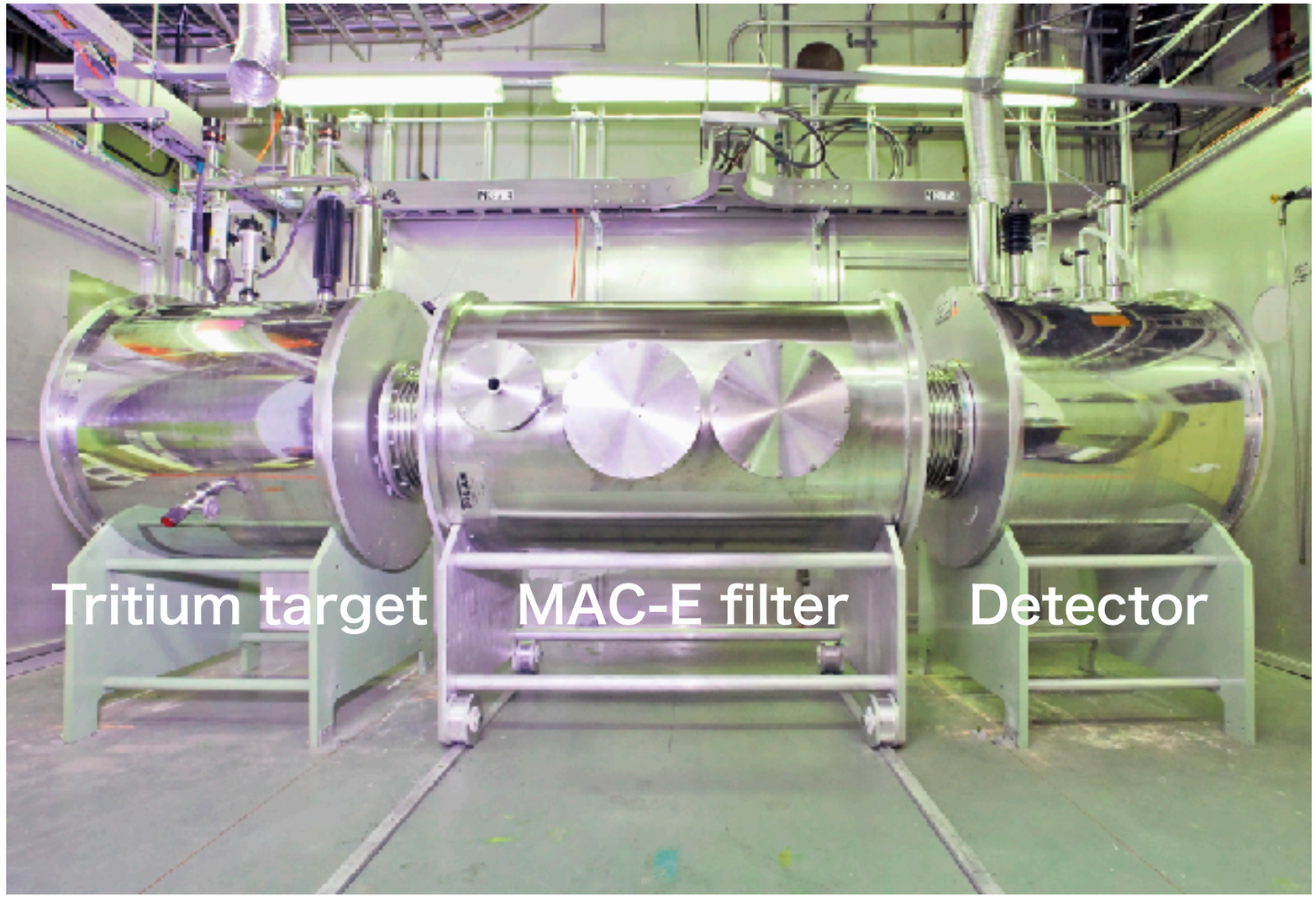
ν_e + ^{3}H → ^{3}He + e$^-$

100g ^{3}H : 10 event/yr

宇宙背景ニュートリノ
（ビッグバンニュートリノ）



arXiv: 1504.03966



PTOLEMY Prototype

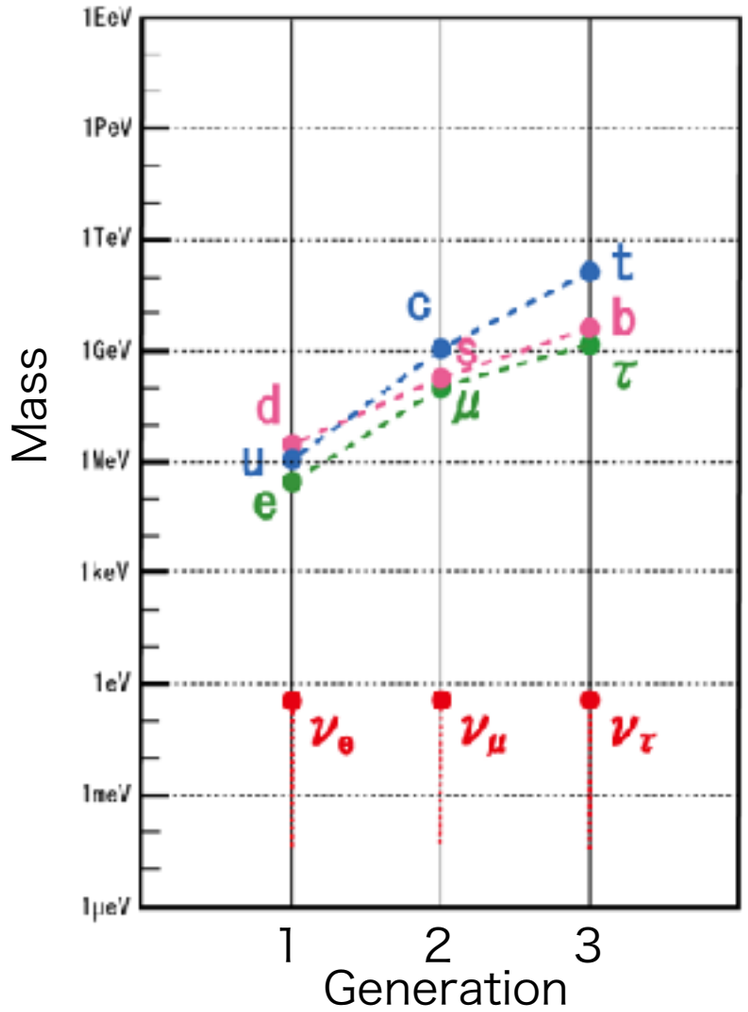
ニュートリノを伴わない

二重ベータ崩壊

ニュートリノ

ニュートリノ振動: $m_\nu \neq 0$

- 質量の絶対値?
- ν_1, ν_2, ν_3の階層構造は?



ニュートリノは軽すぎる

これは不自然だ！

ニュートリノ質量

Dirac $\nu \neq \bar{\nu}$

$m_{\nu R} = m_{\nu L}$

Majorana $\nu = \bar{\nu}$

$m_{\nu R} \neq m_{\nu L}$

マヨラナの場合

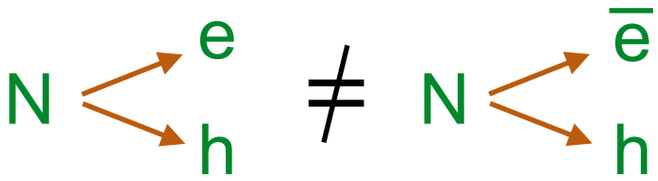
$m_R \gg m_L, m_D$

重い右巻きニュートリノを仮定

$$m_\nu \sim \frac{m_D^2}{m_R}$$

小さい質量はシーソー機構で説明できる。

Early universe



N : 重い右巻き ν

h : ヒッグス

e : 電子

重い右巻きニュートリノがレプトン数非保存を作る(ΔL)

ΔL がバリオン数非保存に繋がる (ΔB)

物質優勢宇宙が説明できる可能性がある

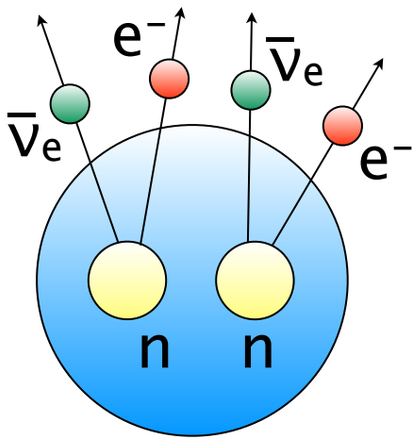
マヨラナニュートリノの検証

- $\nu\,\nu$ (or $\bar{\nu}\,\bar{\nu}$) ビームの対消滅の探索
- ν ビームを使って $\bar{\nu}$ 反応を見る

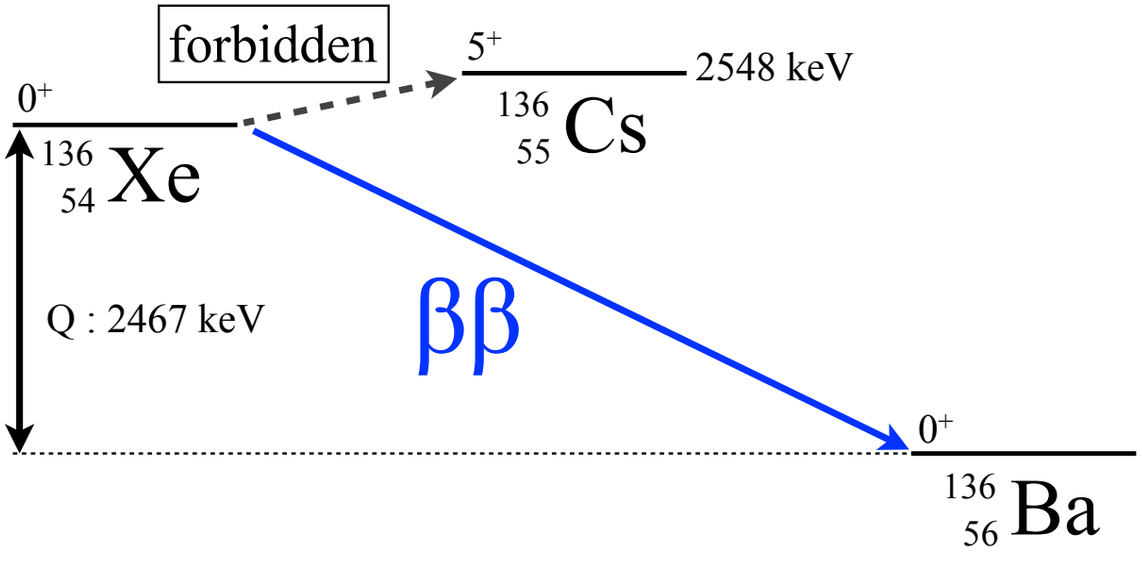
→ 現実的では無い
ν ビームはそんなに絞れない
事象頻度が小さすぎる

2ν (or $2\bar{\nu}$) が小さい空間にあればよい

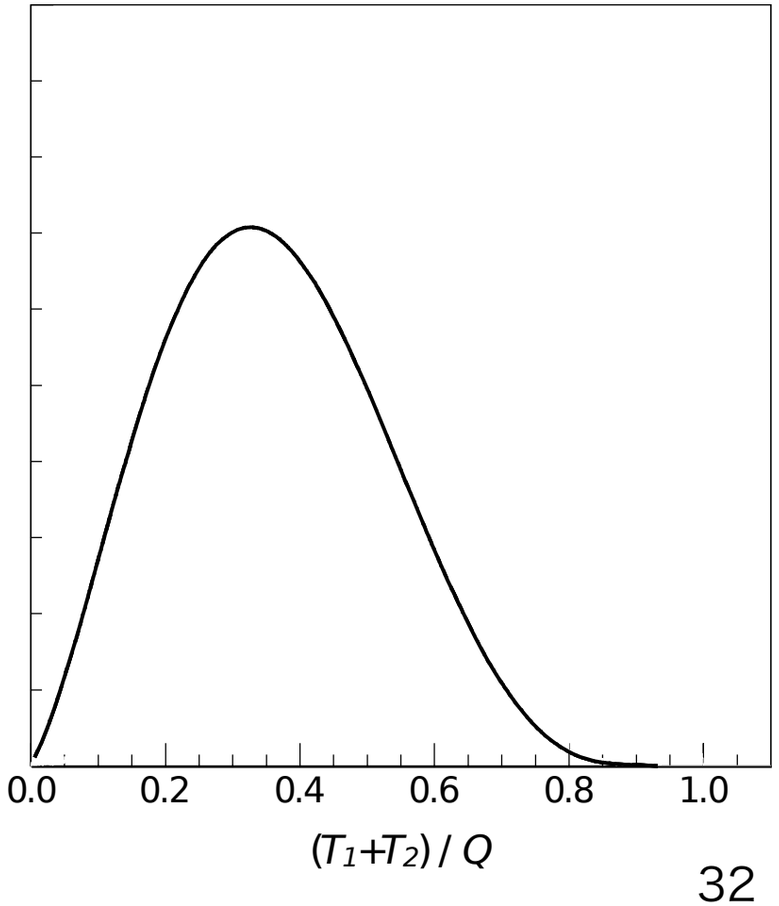
$2\nu\,\beta\,\beta$　　二重ベータ崩壊



- $(A,Z) \longrightarrow (A,Z+2) + 2e^- + 2\bar{\nu}$
- ２次の弱い相互作用
- 連続スペクトル
- 半減期: $T_{1/2} \sim 10^{19\text{~}24}$ year



$2\nu\,\beta\,\beta$ のエネルギースペクトル



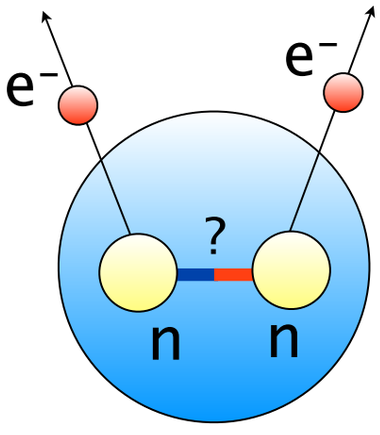
マヨラナニュートリノの検証

- $\nu\,\nu$ (or $\bar{\nu}\,\bar{\nu}$) ビームの対消滅の探索
- ν ビームを使って $\bar{\nu}$ 反応を見る

<u>現実的では無い</u>
ν ビームはそんなに絞れない
事象頻度が小さすぎる

2ν (or $2\bar{\nu}$) が小さい空間にあればよい

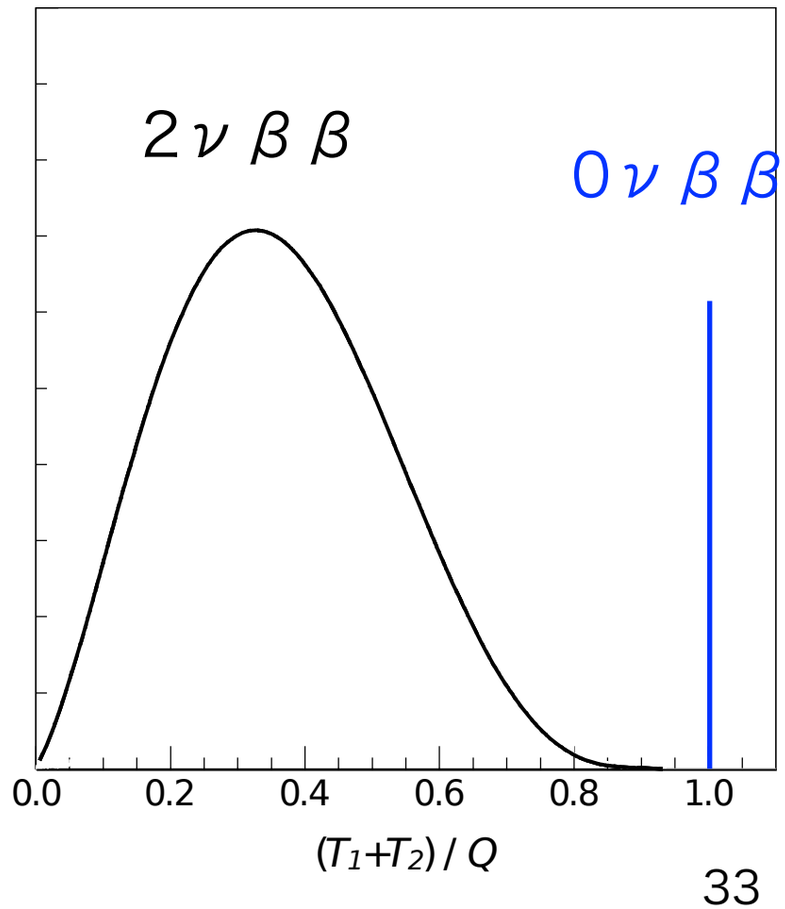
$0\nu\,\beta\,\beta$　　<u>ニュートリノを伴わない二重β崩壊</u>



- (A,Z) ⟶ (A,Z+2) + $2e^-$
- 質量を持つマヨラナニュートリノ
- レプトン数非保存
- Q値にモノクロのピーク
- 未観測

下限値：$T_{1/2} \sim 10^{24\text{~}25}$ year

<u>$\beta\,\beta$のエネルギースペクトル</u>



ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊

$$\left(T_{1/2}^{0\nu}\right)^{-1} = G^{0\nu}|M^{0\nu}|^2\langle m_\nu\rangle^2$$

半減期

位相空間因子

核行列要素

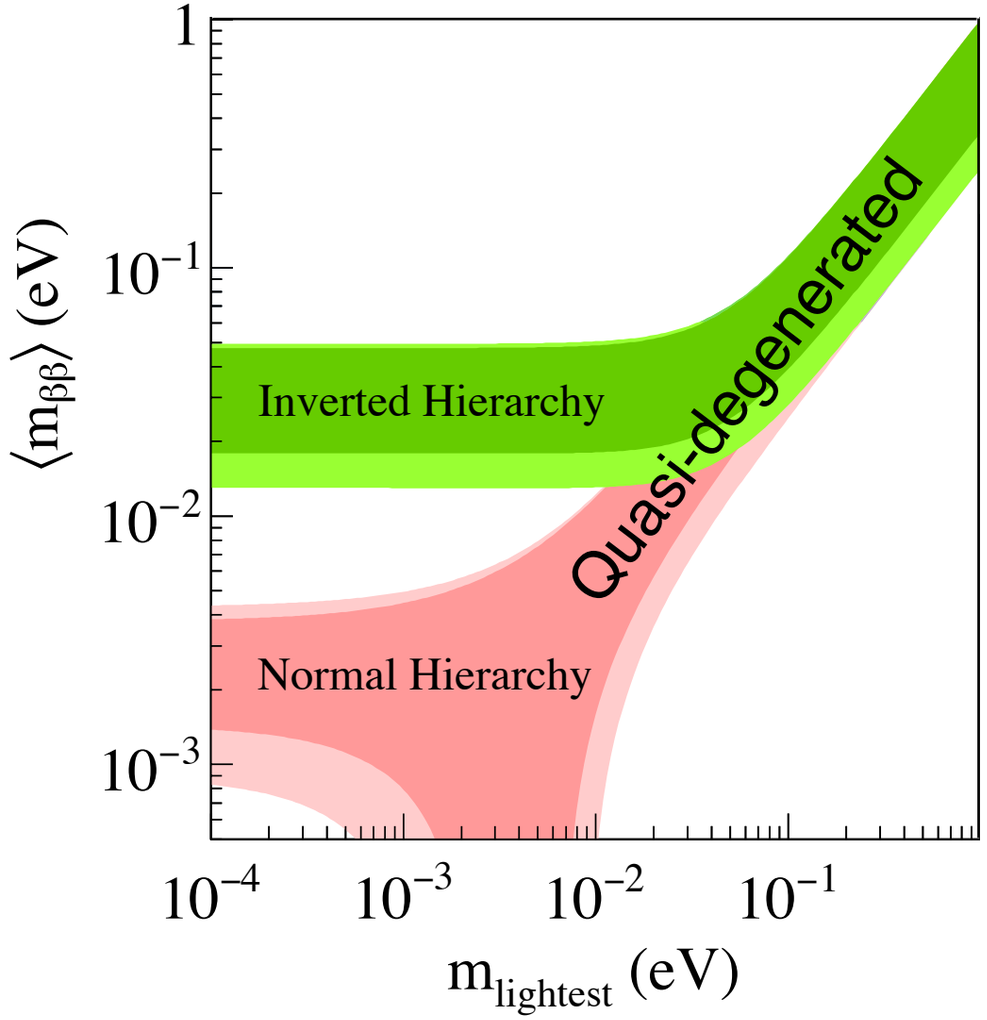
マヨラナ質量

$$\langle m_\nu\rangle \equiv \left||U_{e1}^L|^2 m_1 + |U_{e2}^L|^2 m_2 e^{i\phi_2} + |U_{e3}^L|^2 m_3 e^{i\phi_3}\right|$$

U : PMNS matrix

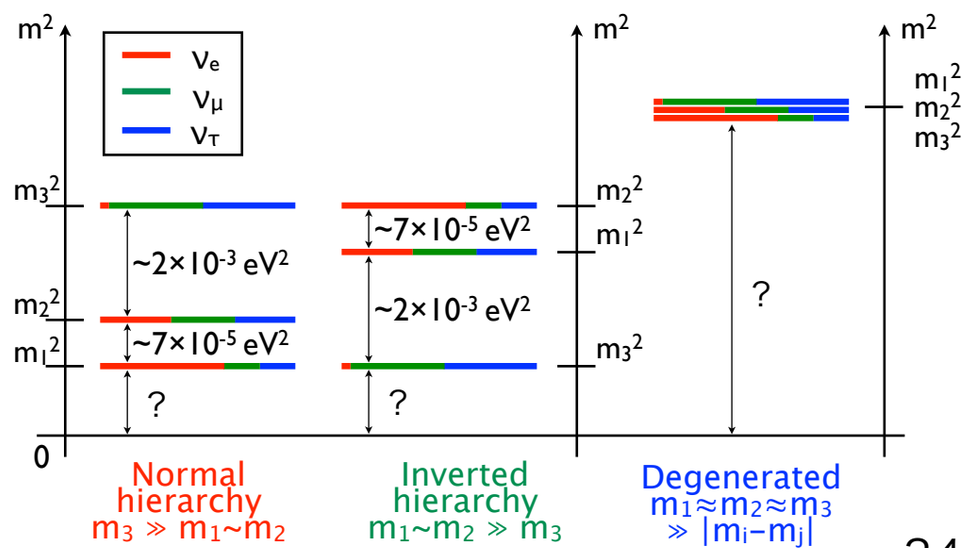
m : neutrino mass

ϕ : majorana phase

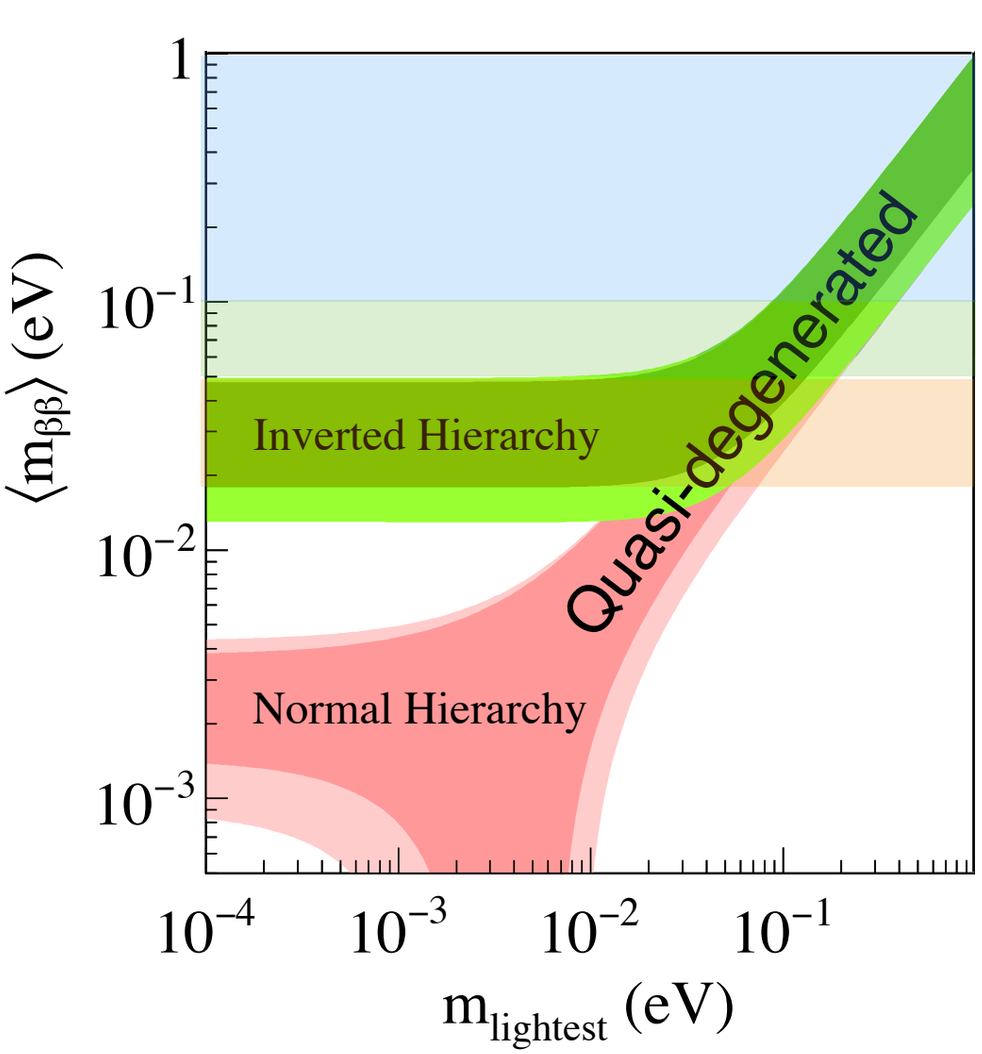


ニュートリノ質量の許容領域

- ニュートリノ振動パラメータ
- 階層構造

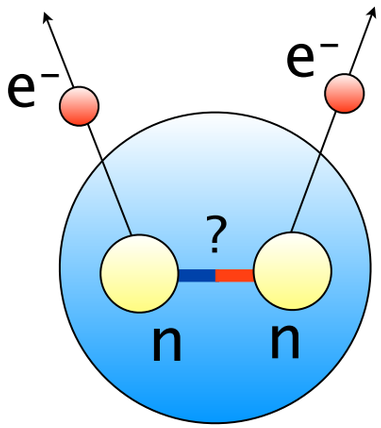


ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊



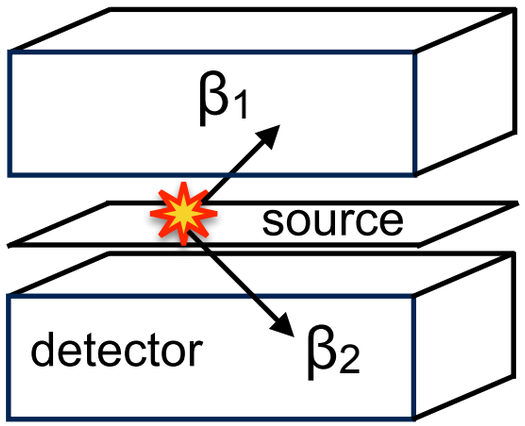
	半減期	必要な原子核の重量
過去および現在 ~100meV	→ 10^{25}~10^{26}y	10~10^{2}kg
近い将来 ~60meV	→ 10^{26}~10^{27}y	10^{2}~10^{3}kg
将来 ~20meV	→ 10^{27}~10^{28}y	10^{3} kg~

0νββ 事象



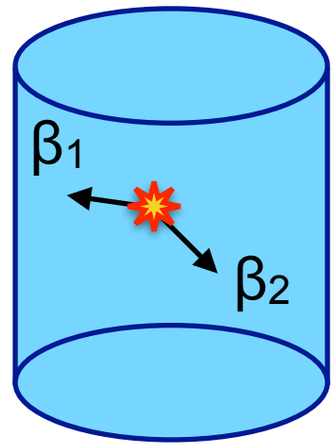
Q値に単色のエネルギーを
持つ2つの電子

source = detector



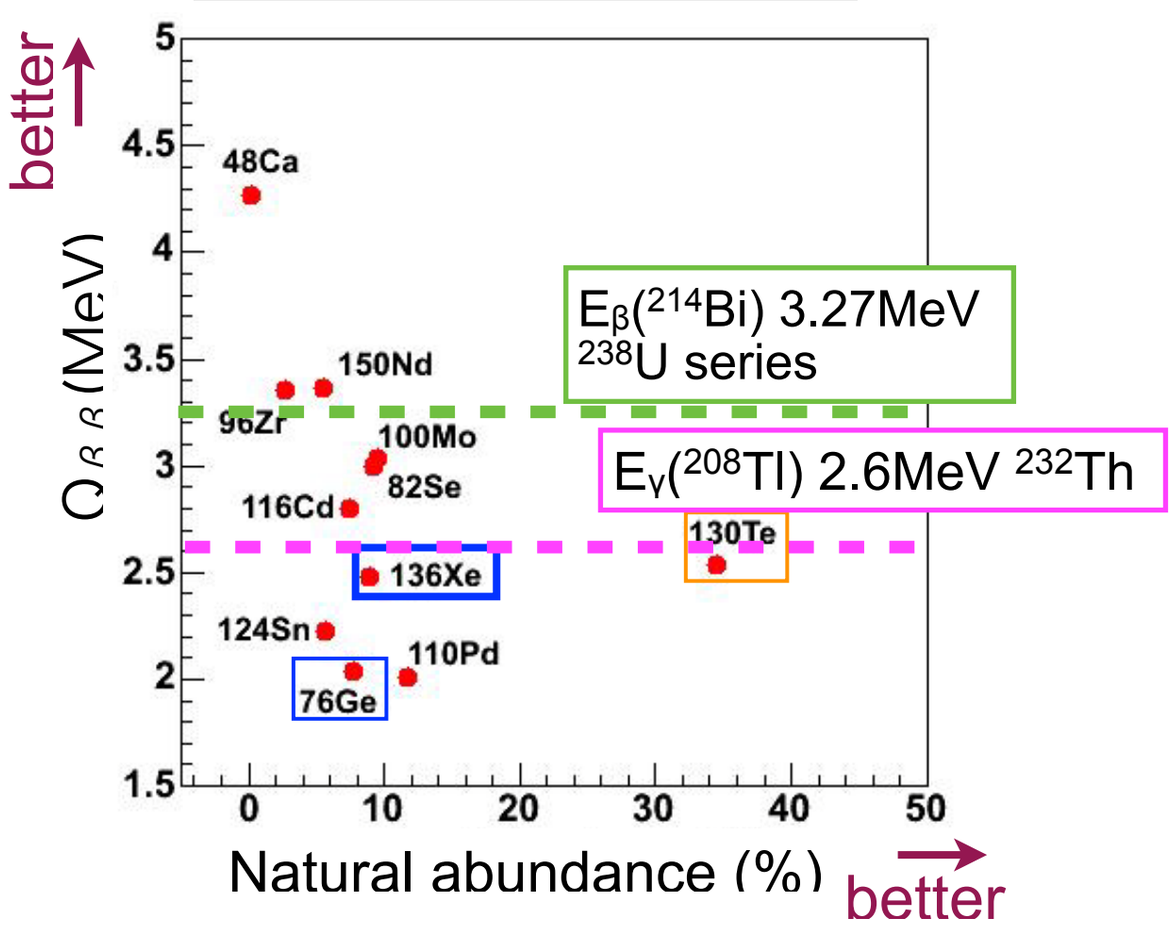
事象パターンを特定

source = detector



大型化が可能

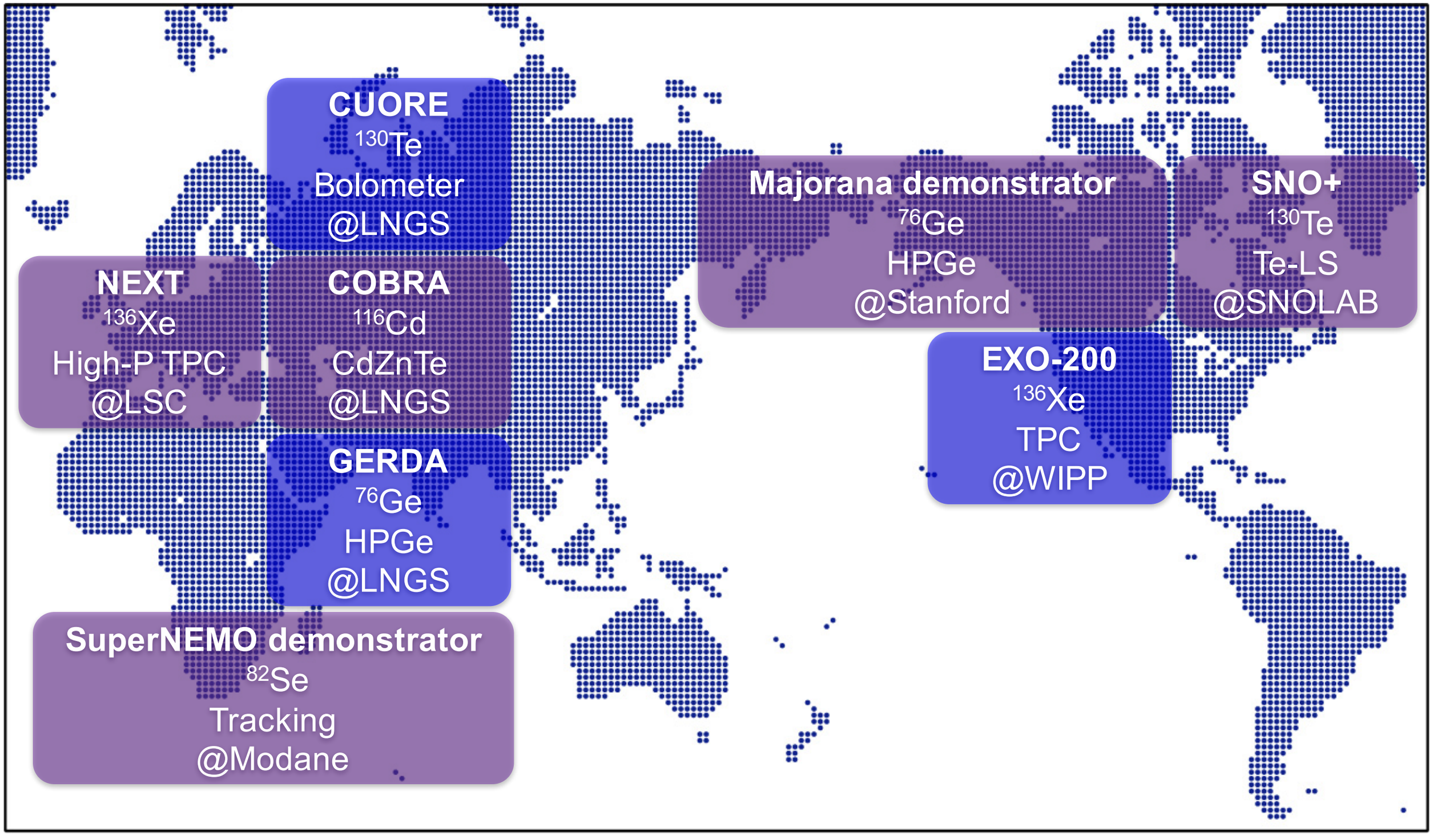
主要な二重β崩壊原子核



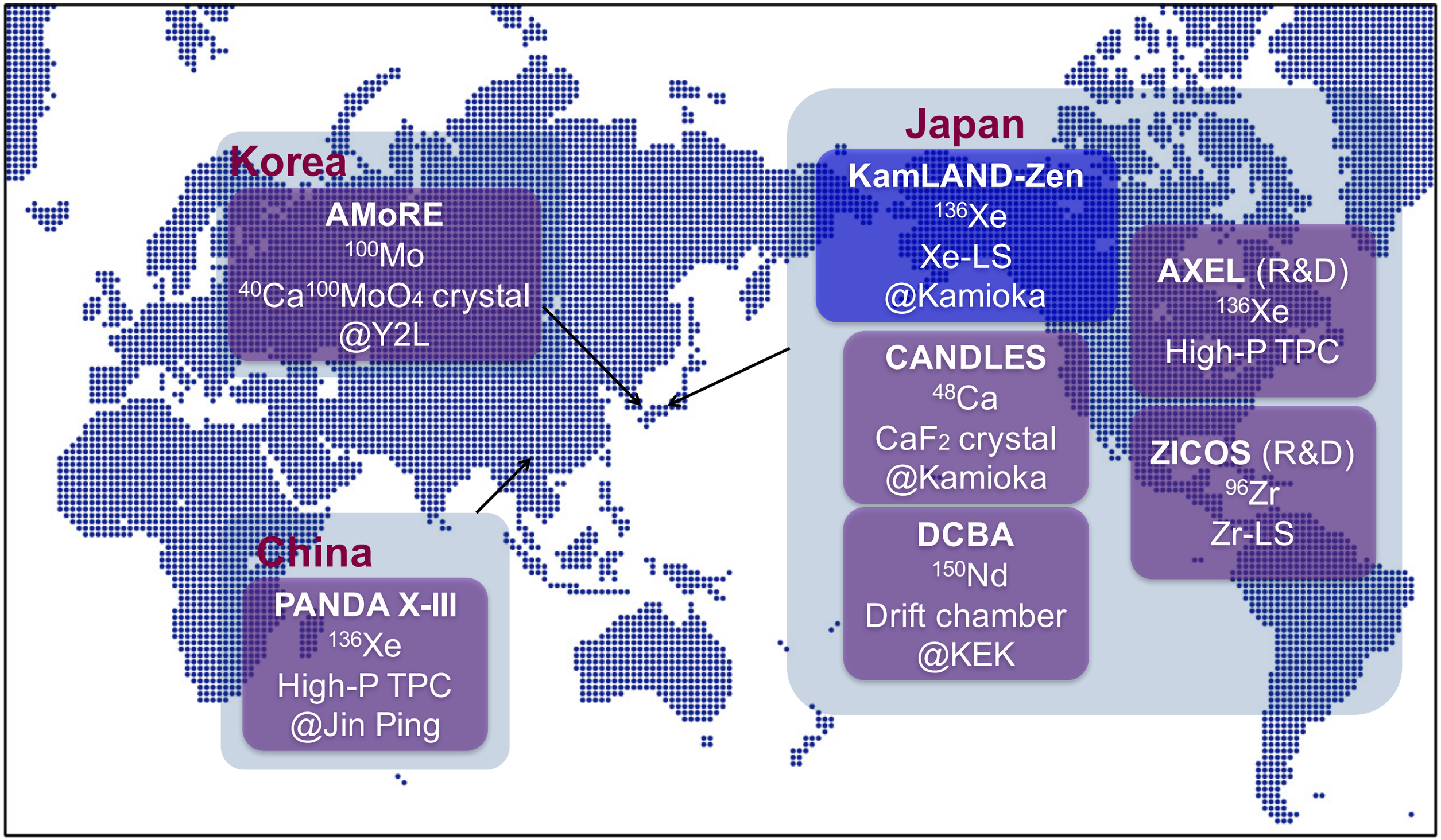
必要なのは

- 極々低い放射能環境
- できるだけ沢山の二重β崩壊核
- 高いエネルギー分解能力
- 高い事象検出効率

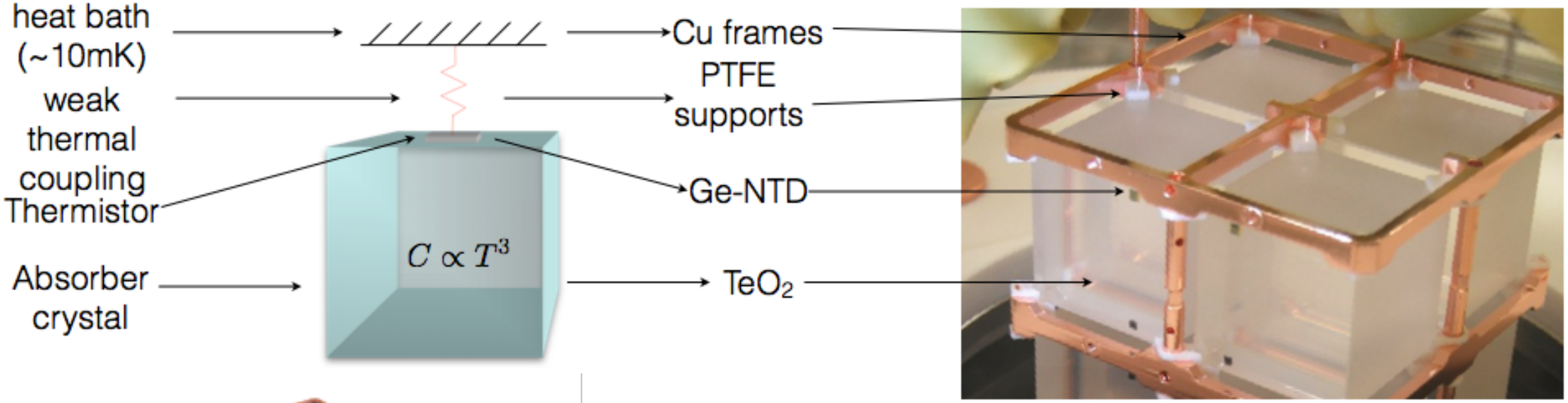
世界の実験 ヨーロッパとアメリカ

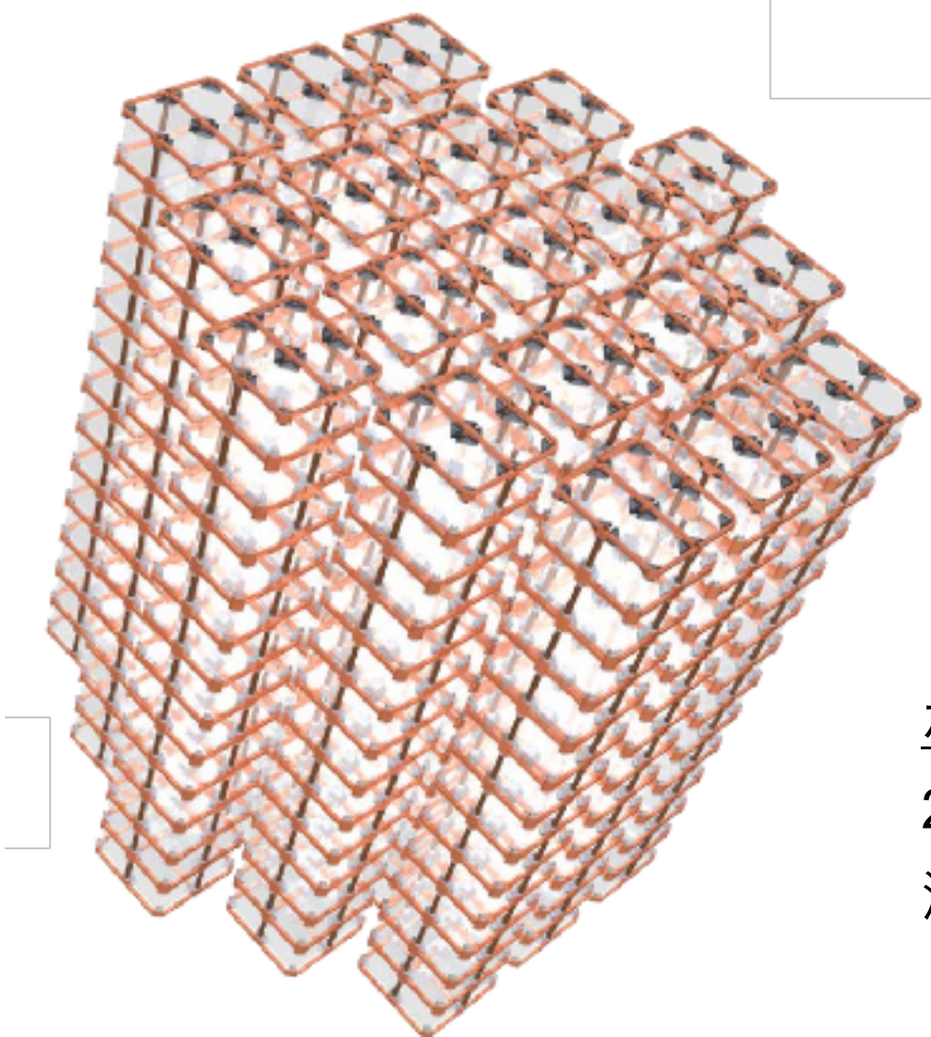


世界の実験　アジア


Korea
AMoRE
^{100}Mo
^{40}Ca^{100}MoO$_4$ crystal
@Y2L
China
PANDA X-III
^{136}Xe
High-P TPC
@Jin Ping
Japan
KamLAND-Zen
^{136}Xe
Xe-LS
@Kamioka
CANDLES
^{48}Ca
CaF$_2$ crystal
@Kamioka
DCBA
^{150}Nd
Drift chamber
@KEK
AXEL (R&D)
^{136}Xe
High-P TPC
ZICOS (R&D)
^{96}Zr
Zr-LS

CUORE



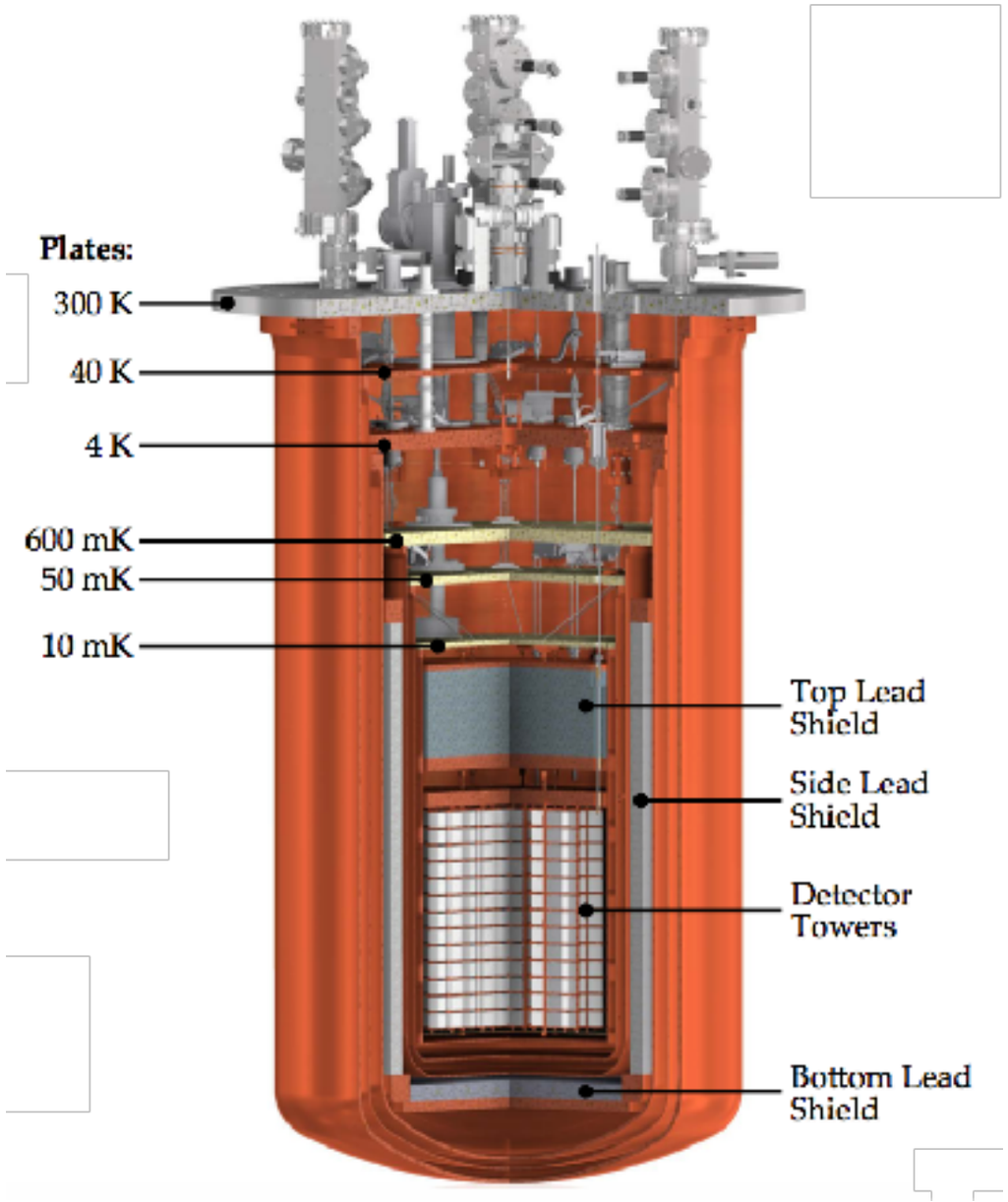


- イタリアグランサッソ
- 水3600m相当深さ
- TeO_2 ボロメータ
- ^{130}Te 206 kg 使用 (TeO_2は742kg)
- 10mKで運転
- エネルギー分解能は約0.2%(FWHM)

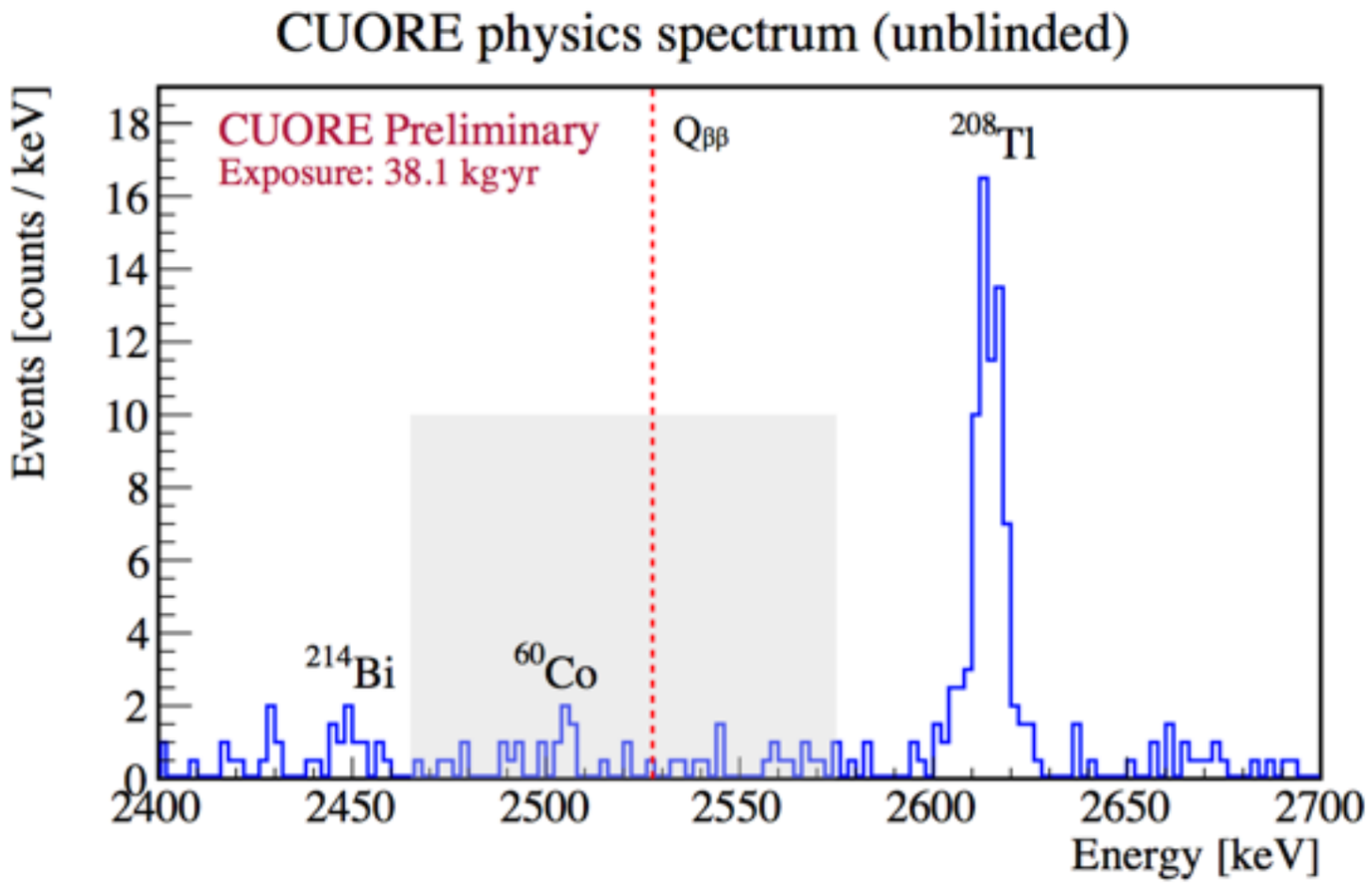
ボロメータ

2βによって結晶が熱を持つ。この時の温度差を温度計で測定し、エネルギーに換算する

CUORE



今年の4月からデータ収集開始



- The combined 90% C.L. limit is

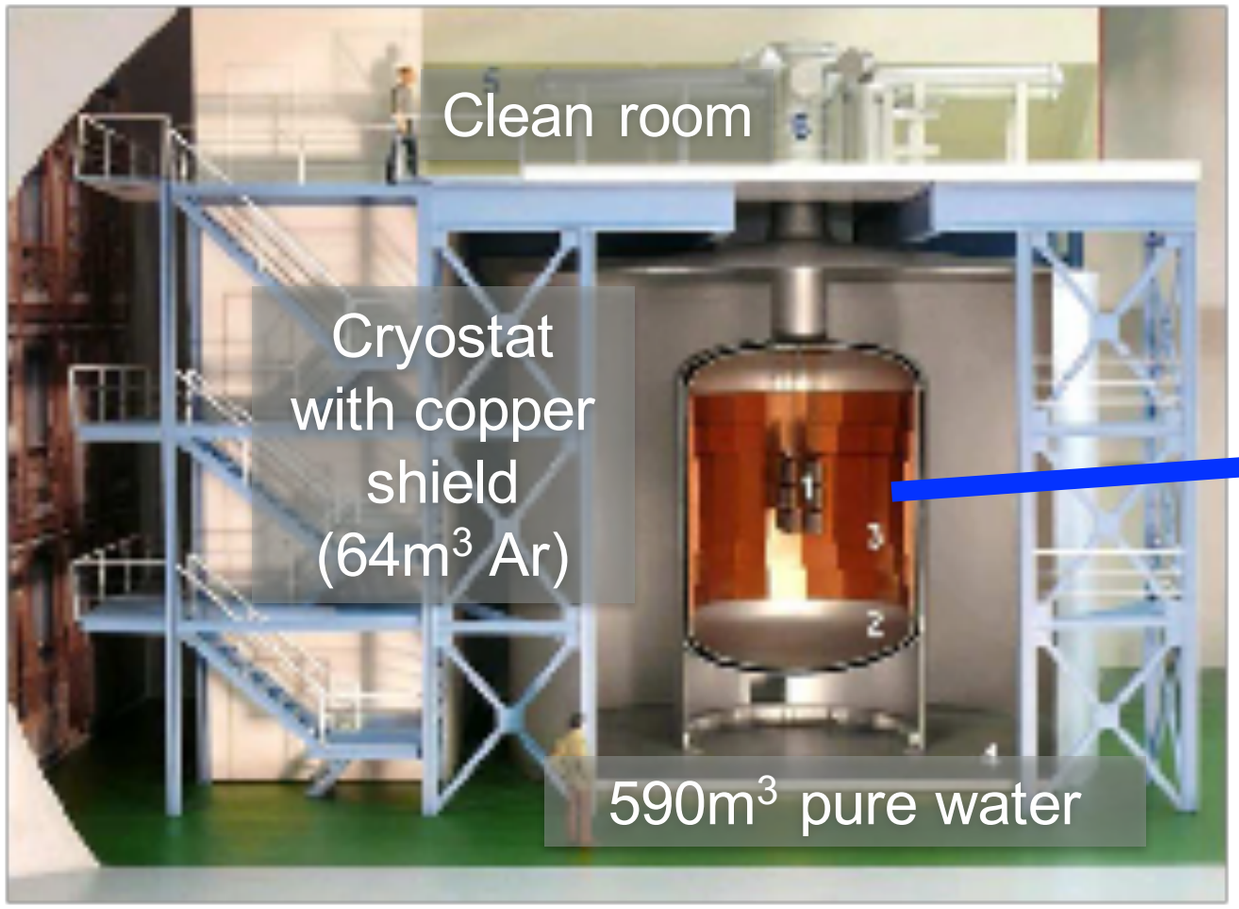
$T_{0\nu} > 6.6 \times 10^{24}$ yr

$m_{\beta\beta} <$ 210–590 meV

(Cuoricino 19.75kg・yr と
CUORE-0 9.8kg・yr の結果も含む)

- 5年の感度 $T^{1/2}$ (^{130}Te) > 9.5×10^{25} yr, $m_{\beta\beta}$ < 50-130meV (90% C.L.)

GERDA

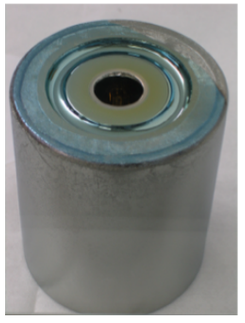


Detector
array
(7 strings)

- イタリアグランサッソ
- 水3600m相当深さ
- 半導体検出器（いわゆるゲルマン検出器）
- エネルギー分解能は

  Coaxical : 4.0 keV(FWHM)
  BEGe : 3.0 KeV(FWHM)

Coaxial



Enriched × 7
15.8 kg
Natural × 3
7.6 kg

\+

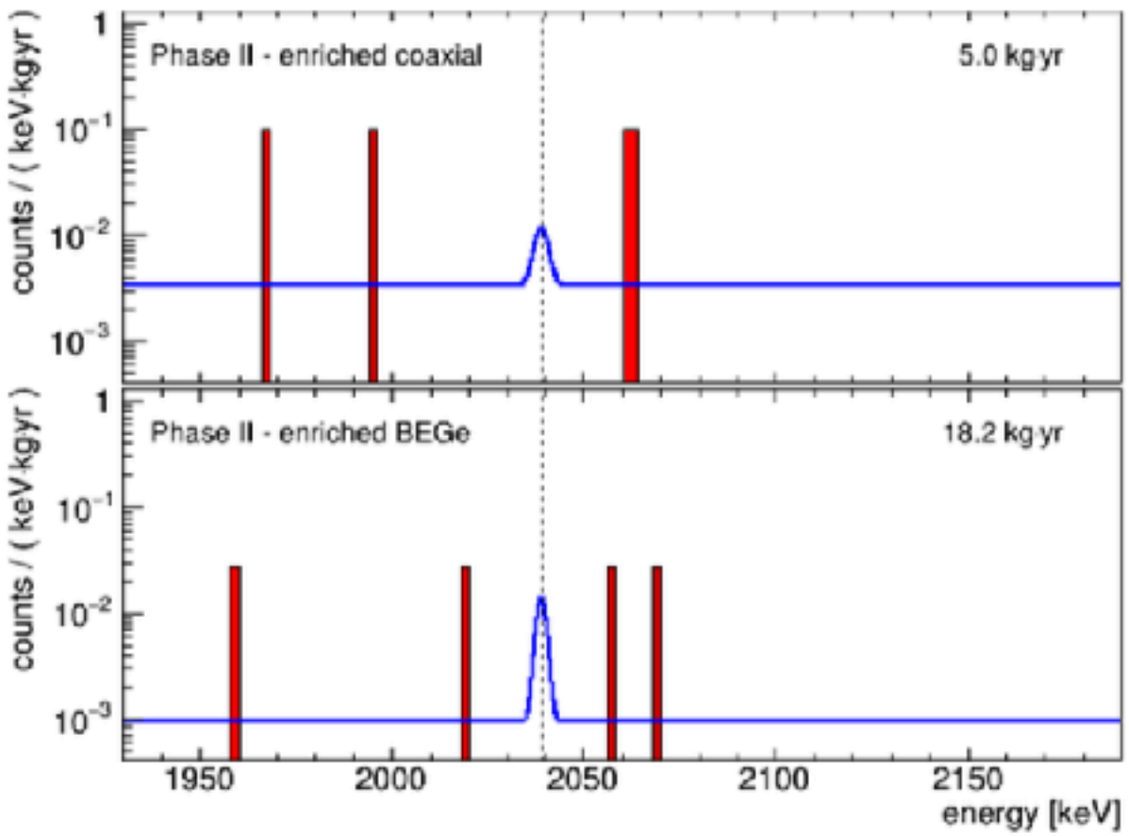
BEGe

Enriched × 30
20.0 kg

GERDA

Statistical analysis

	Exposure (kg·yr)	
Phase I (4 sets)	**23.5**	Same as Nature 544 (2017) 47
Phase II – coax	**5.0**	
Phase II – BeGe	**5.8+12.4 = 18.2**	
	46.7 kg· yr	



- Combined unbinned **maximum likelihood fit** of the six spectra
  - **Frequentist**: test statistics and method after Cowan et al., EPJC 71 (2011) 1554
  - **Bayesian**: flat prior on $1/T_{1/2}$ between 0 and 10^{-24} yr^{-1}
  - Systematic uncertainties folded as pull terms or by Monte Carlo

Preliminary

- Frequentist:

Best fit: $N^{0\nu} = 0$

$T_{1/2} > 8.0 \cdot 10^{25}$ yr @ 90% CL

It was $5.3 \cdot 10^{25}$ yr in Phasella

MC Median sensitivity (no signal):

$5.8 \cdot 10^{25}$ yr (for 90% C.L.)

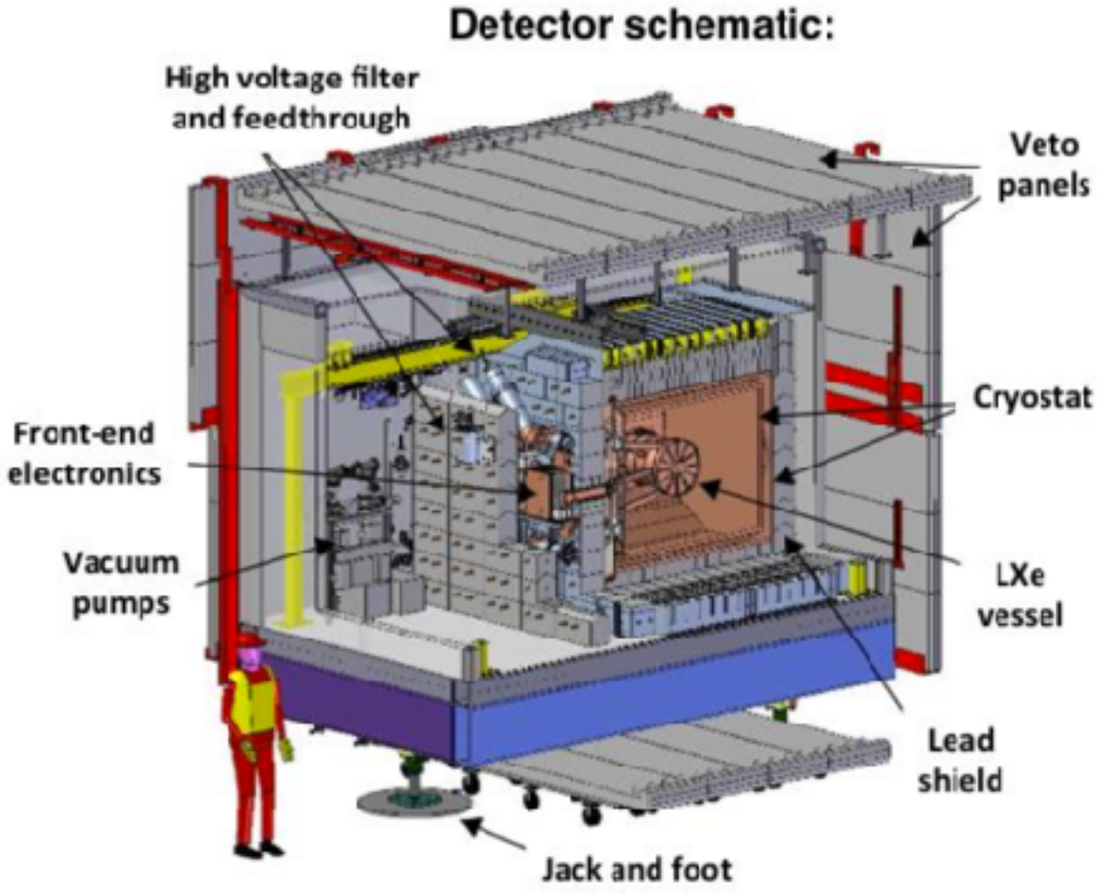
30% chance to have a better limit

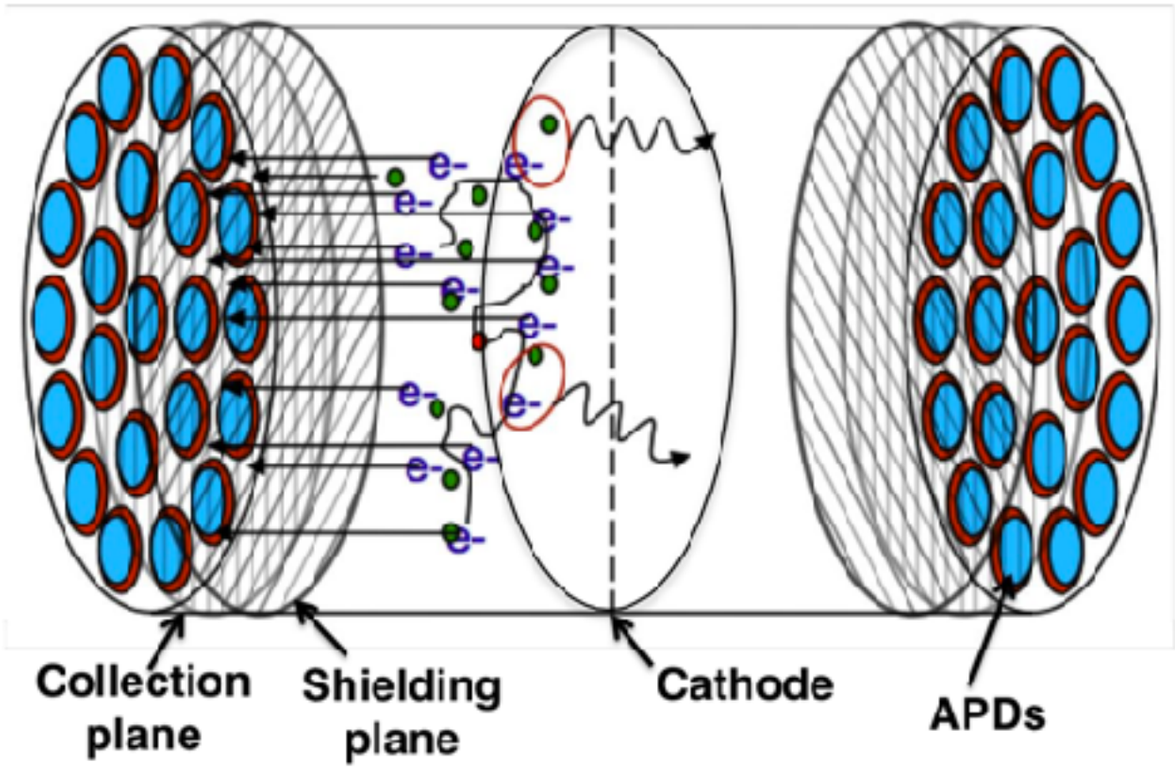
- Bayesian:

$T_{1/2} > 5.1 \cdot 10^{25}$ yr @ 90% CI

Median sensitivity $4.5 \cdot 10^{25}$ yr

EXO-200



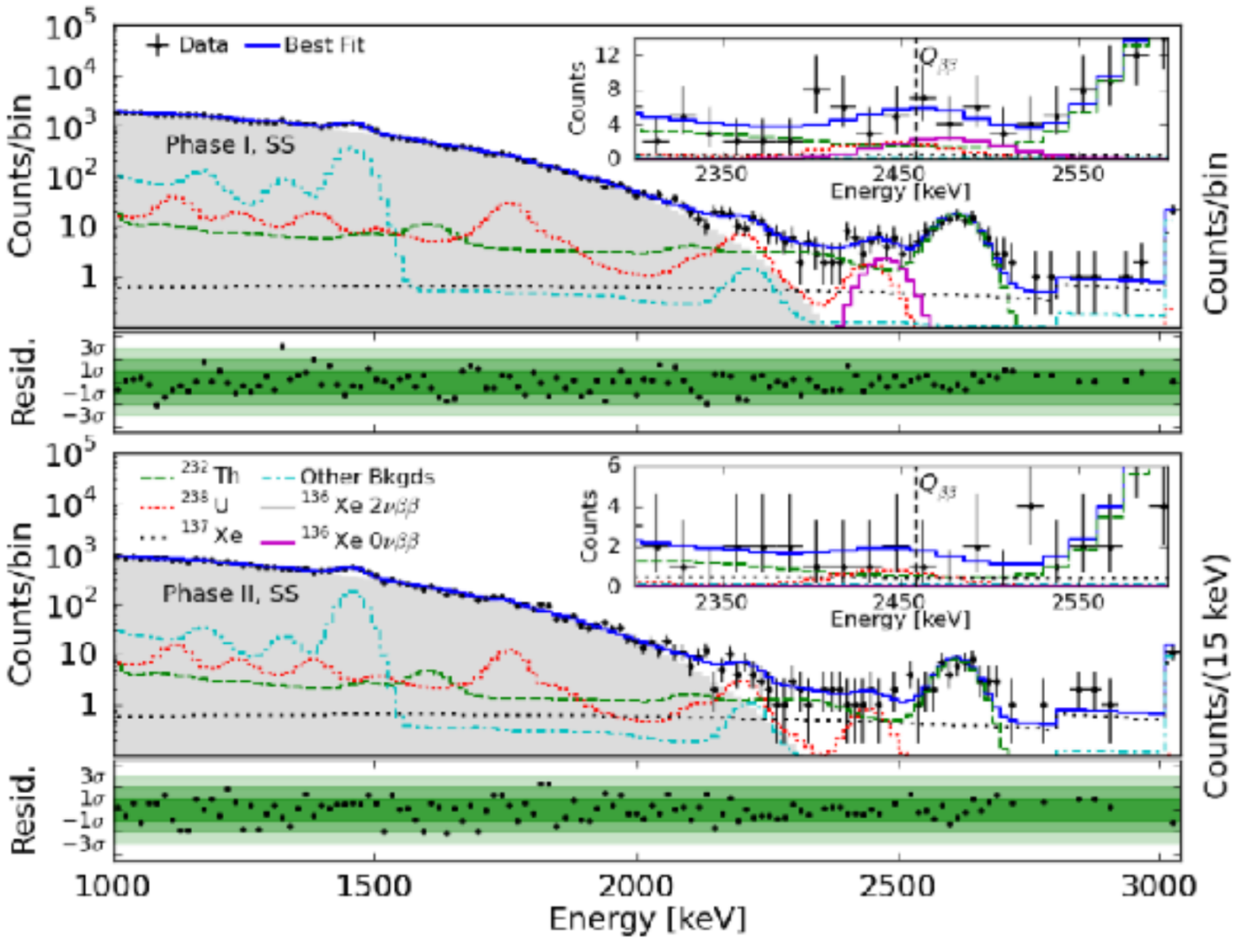


- アメリカニューメキシコ州WIPP
- 水1600m相当深さ
- 液体キセノンTPC (Time Projection Chamber)
- キセノン発光とイオン化した電子の複合測定
- エネルギー分解能は1.38%->1.23%(σ)

EXO-200

Results

- Background model + data → maximum likelihood fit
- Combine Phase I + Phase II profiles



Systematics	Phase I (%)	Phase II (%)
Detection efficiency	82.4 ± 3.0	80.8 ± 2.9
Shape differences	±6.2	±6.2
SS fraction	±5.0	±8.8

- Combined analysis:
  - Total exposure = 177.6 kg.yr

Sensitivity of 3.7×10^{25} yr (90% CL)

$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1.8 \times 10^{25}$ yr

$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 147 - 398$ meV

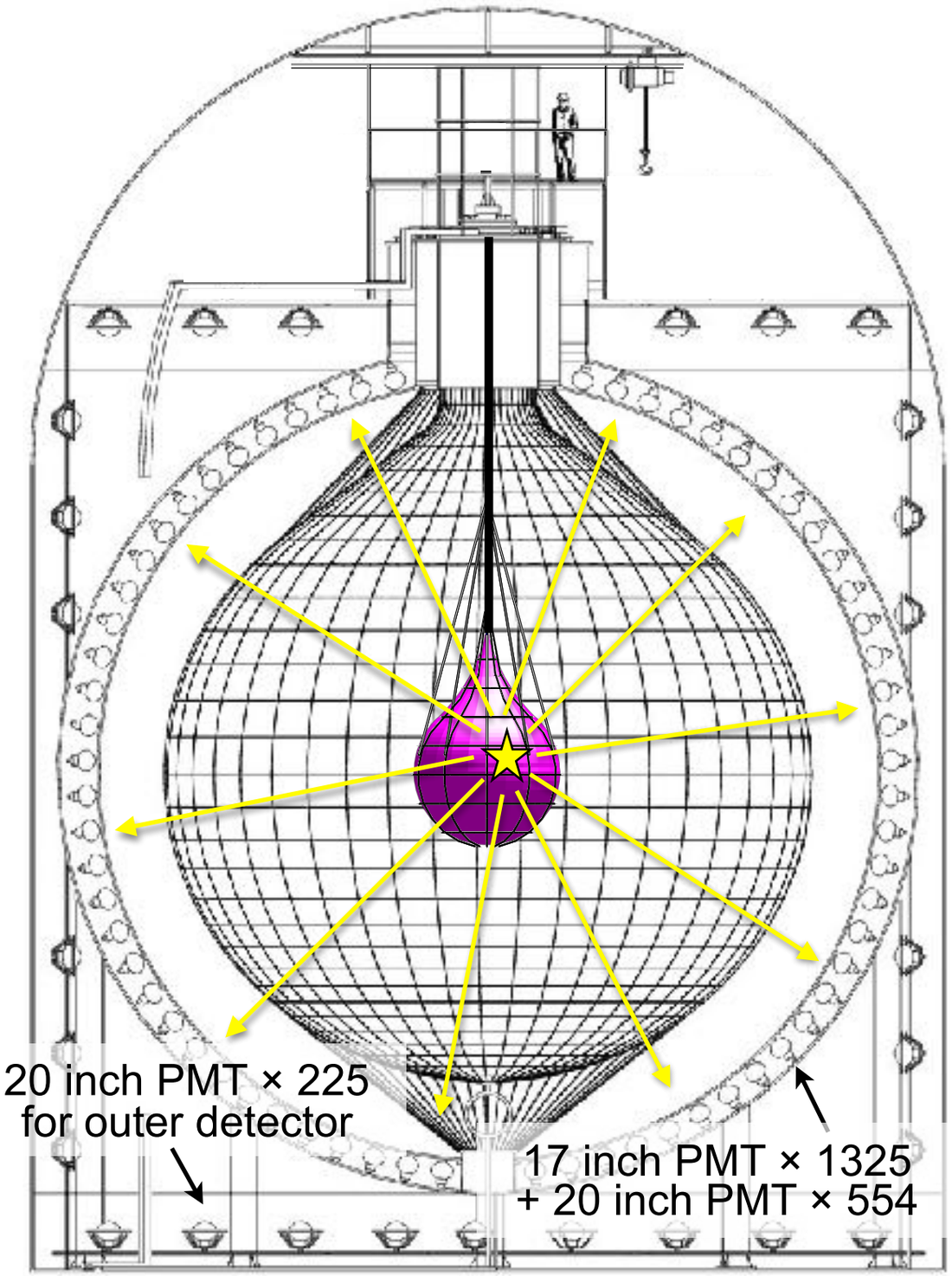
(90% C.L.)

arXiv: 1707.08707

KamLAND-Zen

Kamioka Liquid scintillator
Anti-Neutrino Detector
Zero neutrino double beta
decay search

- 神岡鉱山に設置, 2700 mの水相当深さ
- カムランドを改造



KamLAND

- 半径6.5mバルーンの中に1000トンの液体シンチレータ(LS)を保持
- β、γ、α、pなどの放射線によって発光する
- 光はステンレスタンク内部に敷き詰められた光電子増倍管で検出
- 光の到達時間で反応位置、光子数を元にエネルギーを特定する

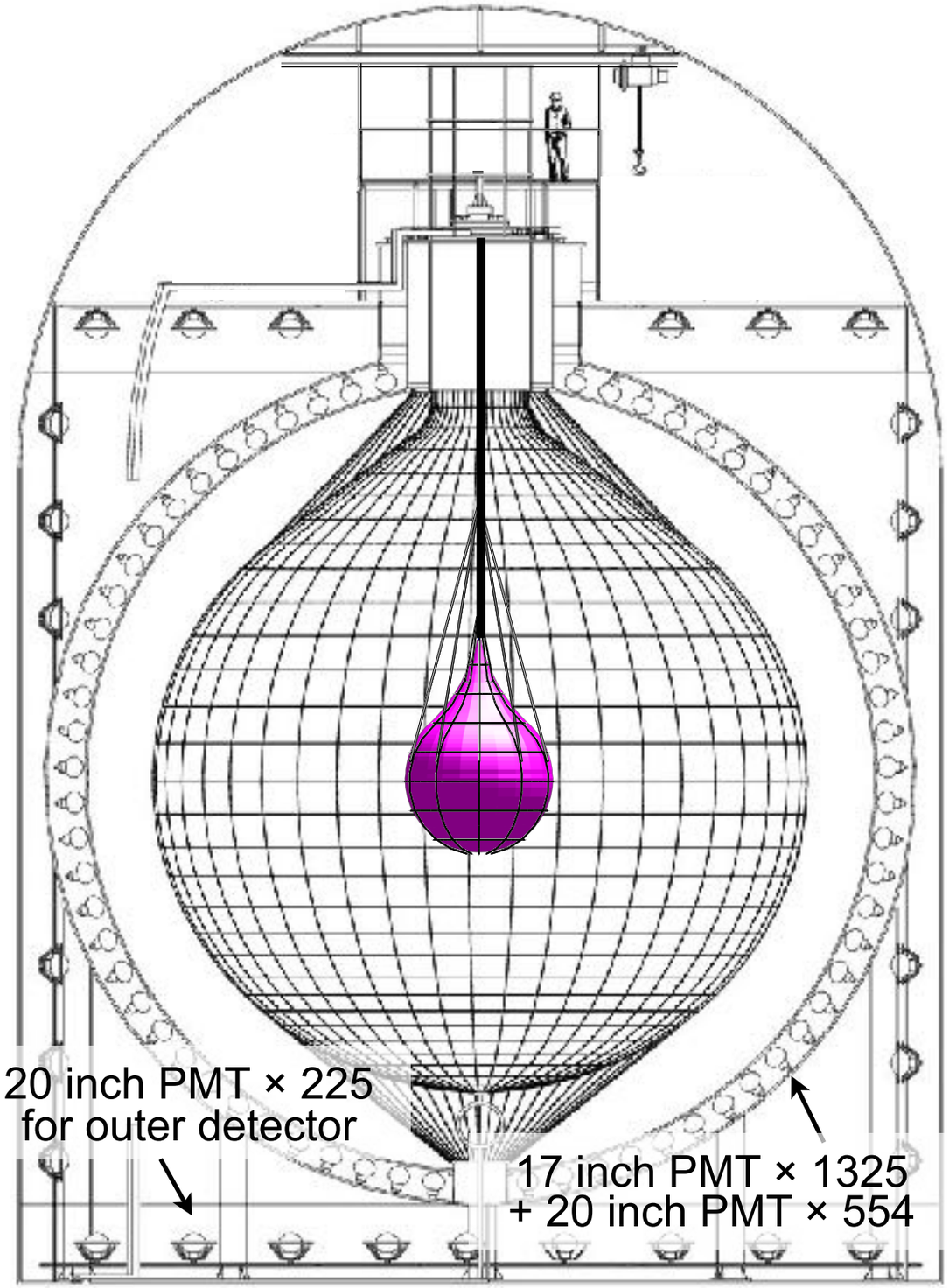
KamLAND-Zen

- 内部バルーンの中に^{136}Xe を溶かしたLS
- 90.6% に濃縮した ^{136}Xe
- 内部バルーンは半径1.54m
- キセノンガスはLSに3.2wt%溶ける

KamLAND-Zen

- 神岡鉱山に設置, 2700 mの水相当深さ
- カムランドを改造

Kamioka Liquid scintillator
Anti-Neutrino Detector
Zero neutrino double beta
decay search



KamLAND
- カロリメータタイプの検出器
- 外部バルーン中の液体シンチレータの
  U, Thは10^{-17} ~ $^{-18}$ g/g レベル

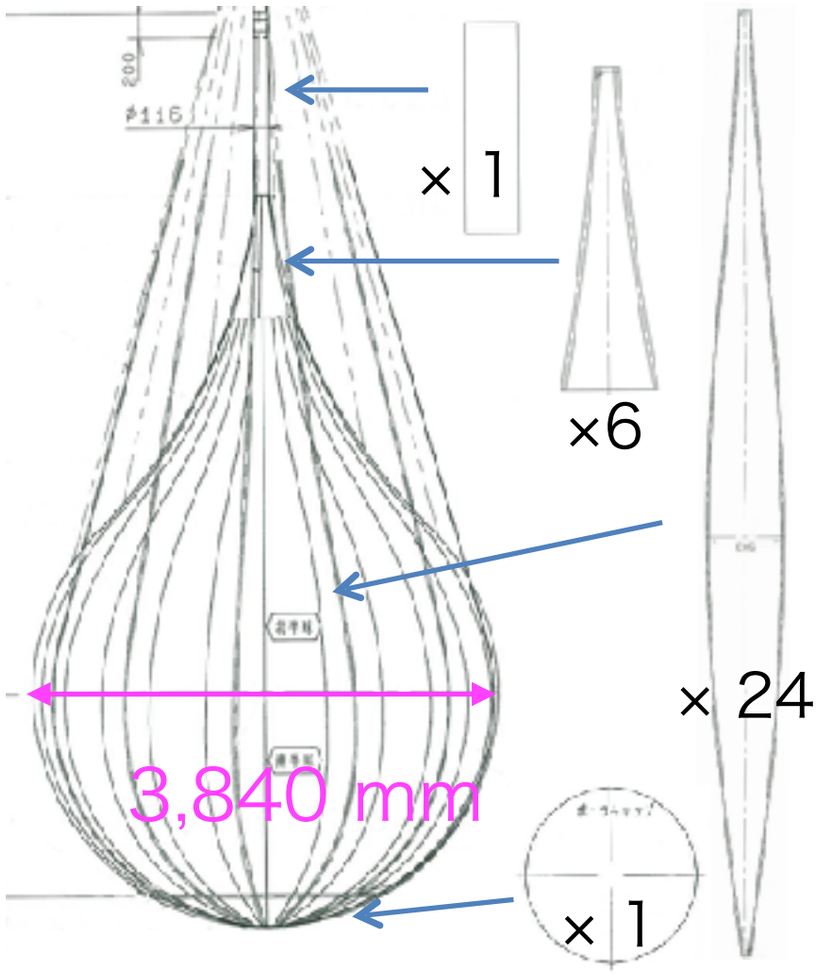
優位な点
- 低放射能環境

  U, Th : 10^{-17} ~ $^{-18}$ g/g level in LS
  外部からのγ線は液体シンチレータで遮蔽
- 大きい検出器 → 大型化が可能

  将来的にトンスケールに拡張可能
- 320 ~ 383 kg のキセノンを使用

  (KamLAND-Zen 400の場合；崩壊核重量が最大)

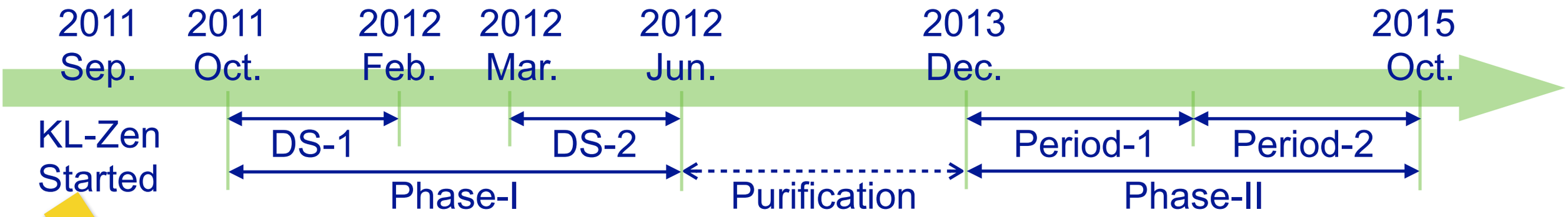
カムランド禅の内部バルーン



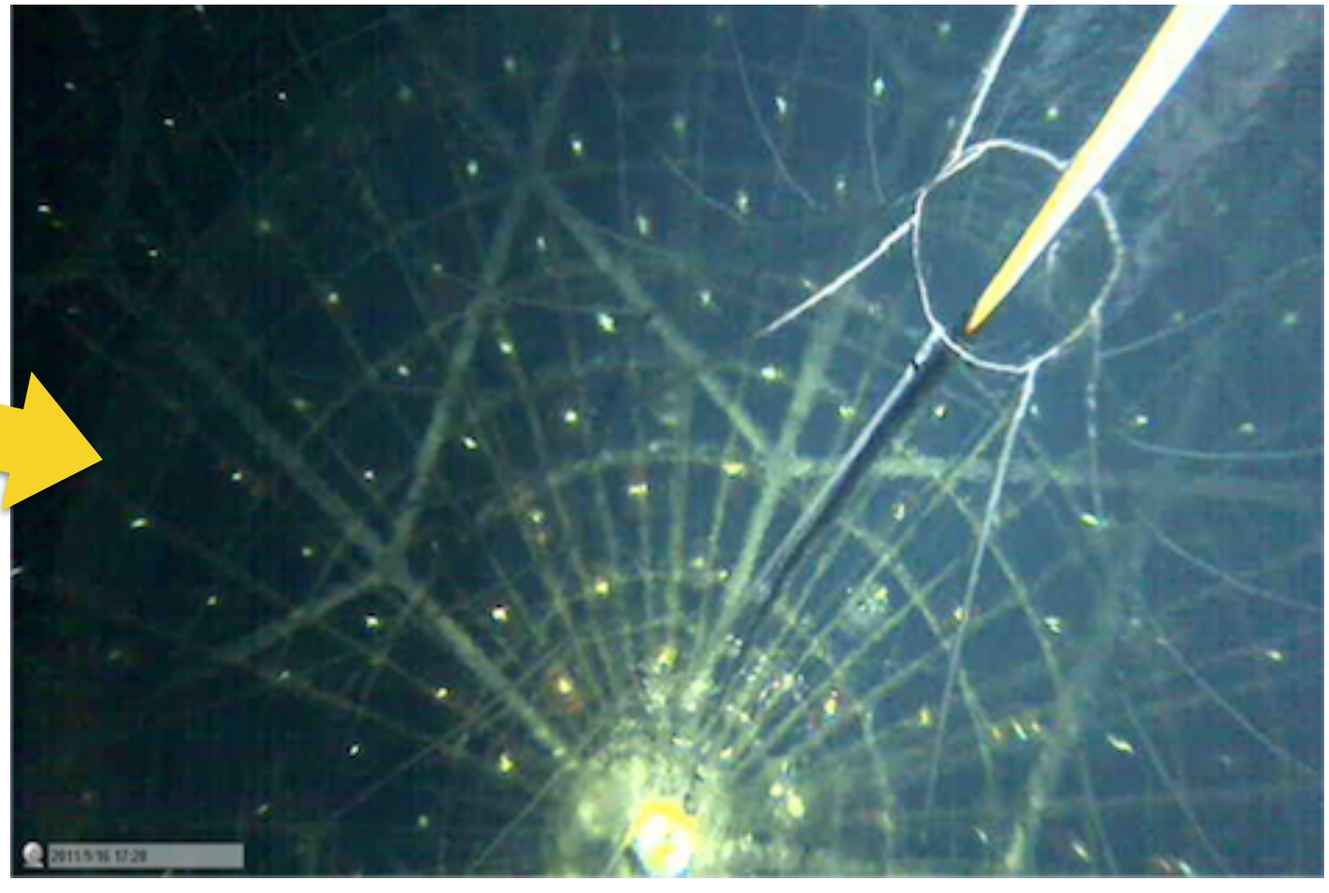
内部バルーン

- 基本的に金属は多めの^{238}U, ^{232}Th を含む。少量でもこの実験では無視できない
- 全ての物質は少量でも^{238}U, ^{232}Thを含むので、できるだけ低質量の容器が必要
- 容器は透明でなければならない
- クラス１のスーパークリーンルームで25ミクロンのナイロンフィルムを溶着して内部バルーンを製作

KamLAND-Zen 400 の運転



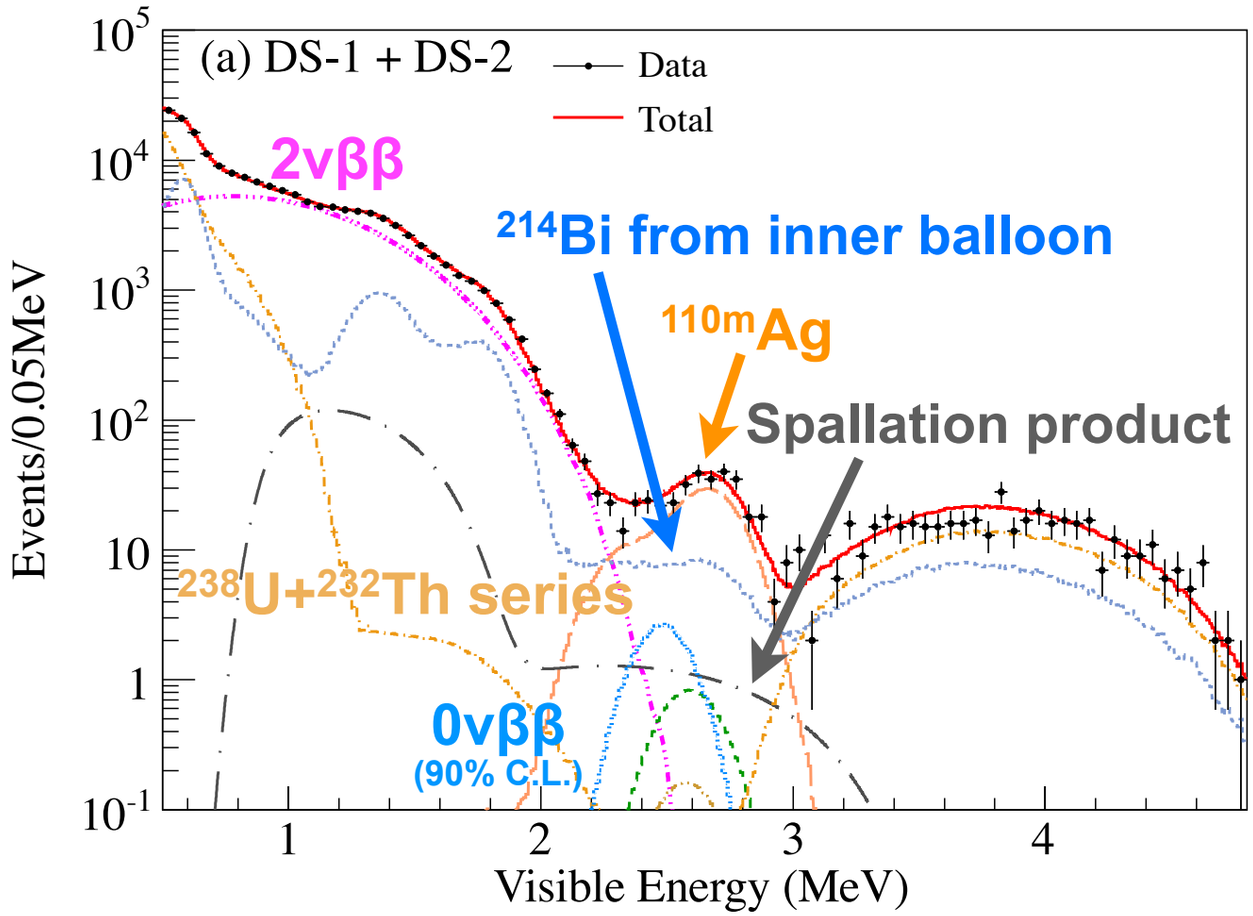
内部バルーンのインストール



検出器内部でバルーンを膨らませた後

KamLAND-Zen 400 フェーズI

Phys. Rev. Lett. 110, 062502 (2013)　　^{136}Xe 89.5 kg-yr



0νββ 半減期に対する下限値

$T^{1/2} > 1.9\times10^{25}$ yr (90% C.L.)

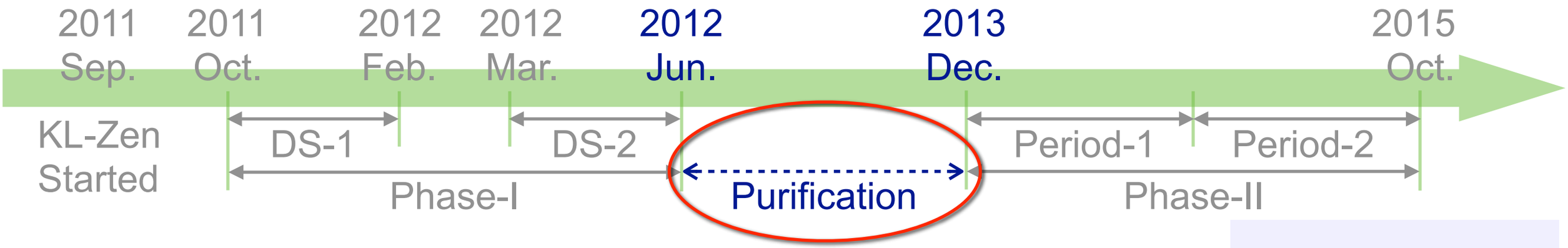
- 当時最も厳しい制限
- 多くの ^{110m}Ag 起源ノイズが存在

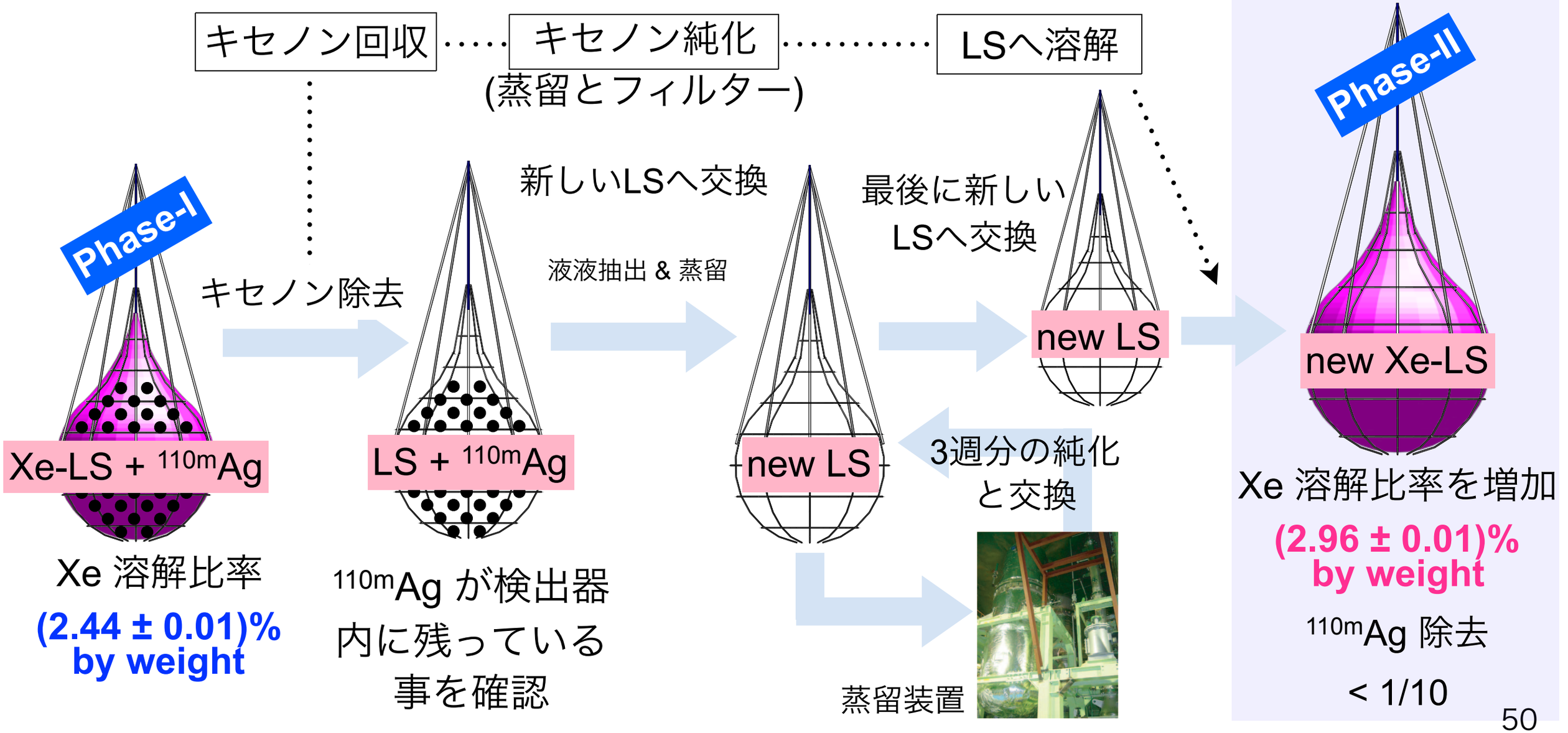
^{110m}Ag ノイズ事象

- 実験開始当初は想定外
- 福島原子力発電所事故によって放出された核分裂生成物
- 液体シンチレータ内にもバルーン表面にも存在している

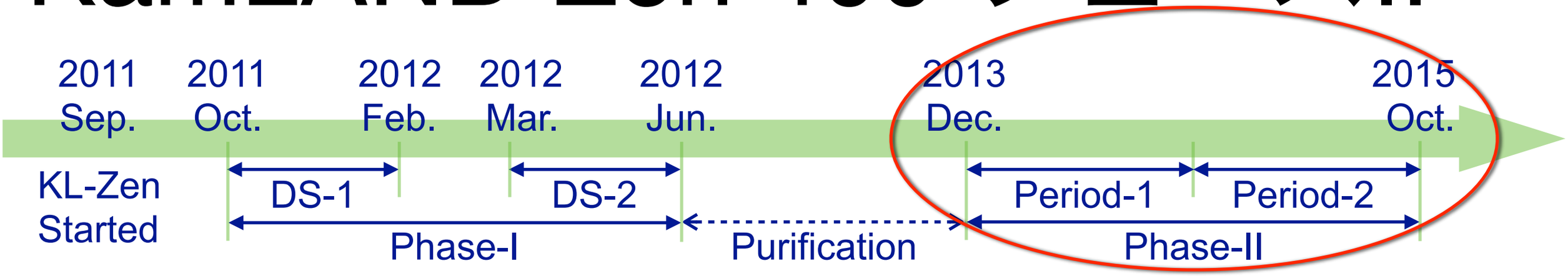
純化が必要

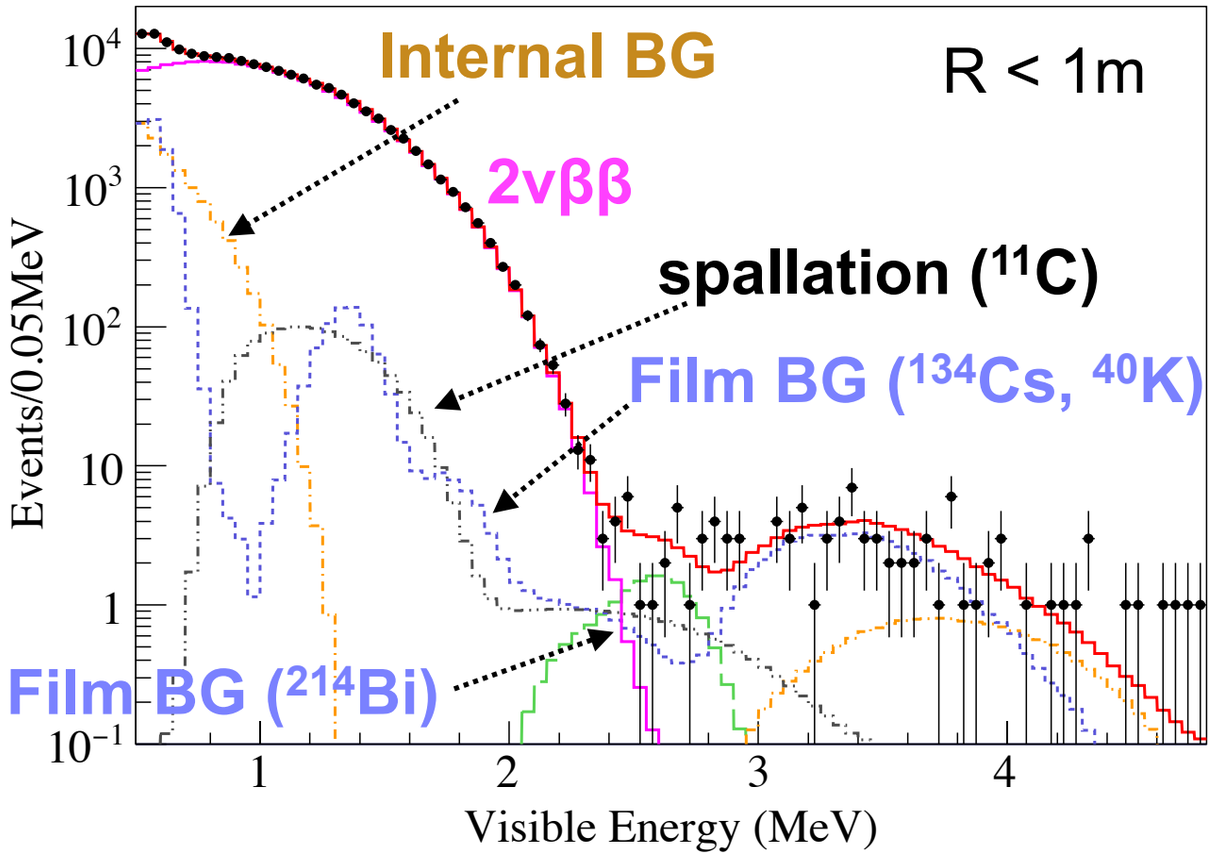
KamLAND-Zen 400 の純化



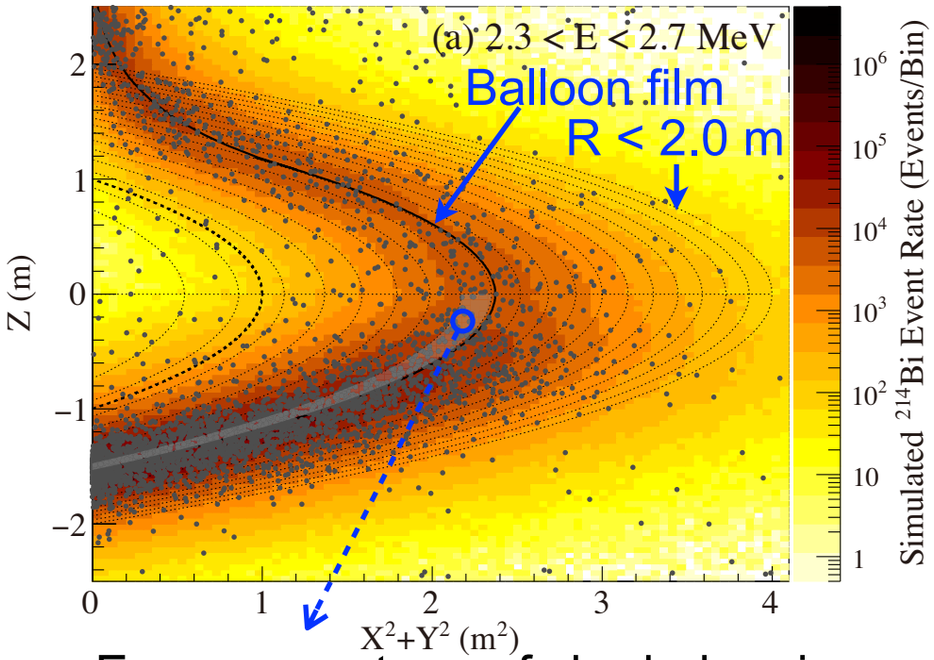


KamLAND-Zen 400 フェーズII

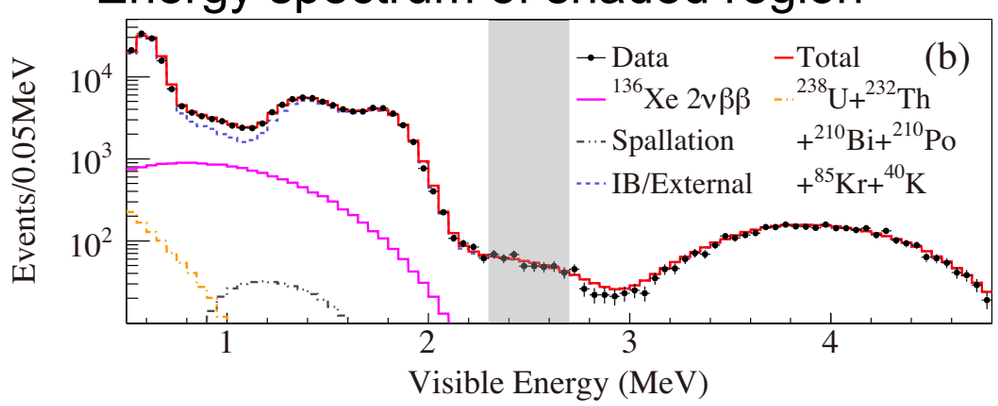




Data (black dots) & ^{214}Bi sim (color)



Energy spectrum of shaded region



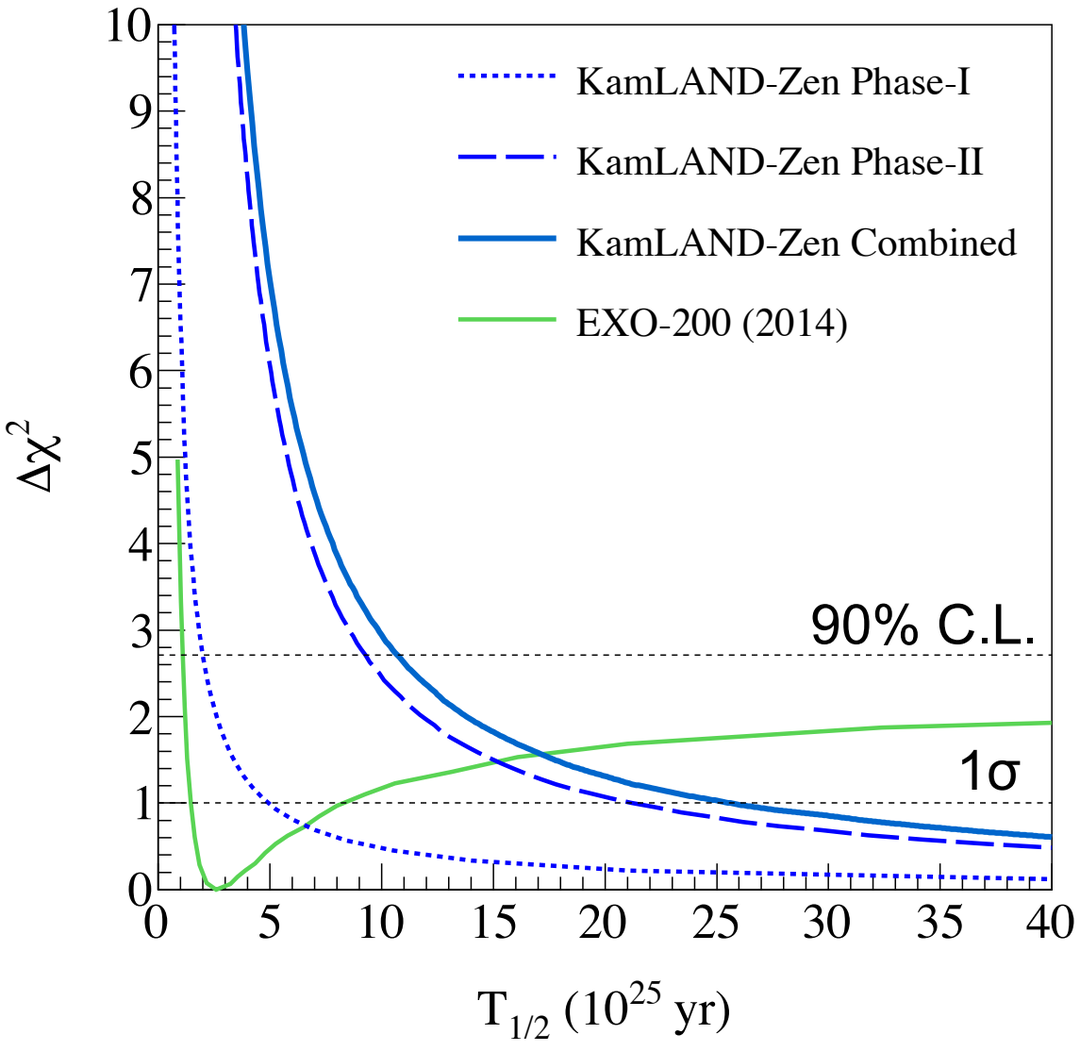
Multi-volume selection for analysis optimization

Target volume for spectral fit : R < 2.0 m

R 20bin (same volume in each radius bin)× Theta 2bin (lower / upper hemisphere)

KamLAND-Zen 400 の結果

^{136}Xe 半減期への制限

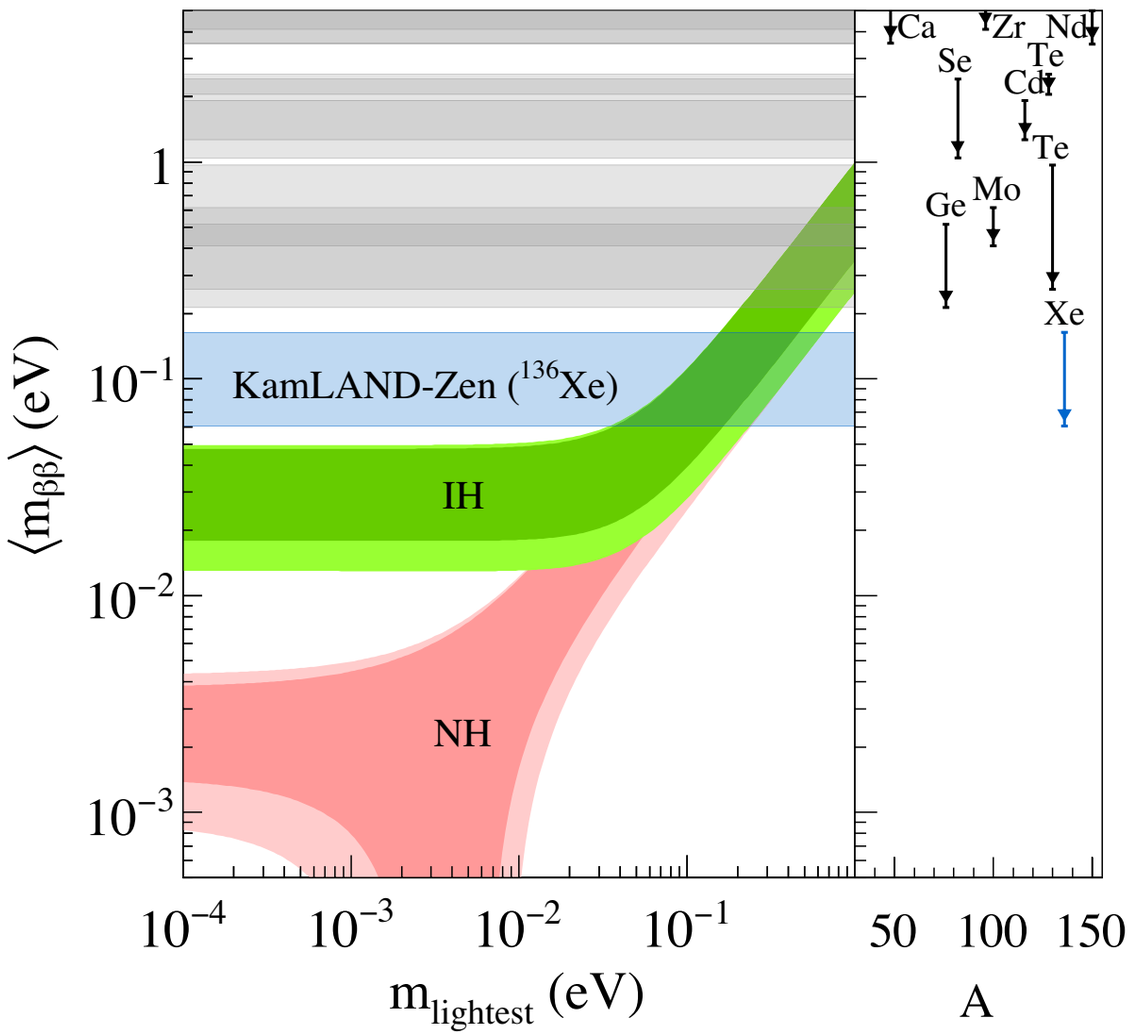


フェーズ1&2を統合した結果

$T^{1/2} > 1.07\times10^{26}$ yr (90% C.L.)

Phase-1: $T^{1/2} > 1.9\times10^{25}$ yr
Phase-2: $T^{1/2} > 9.2\times10^{25}$ yr

マヨラナニュートリノ質量への制限

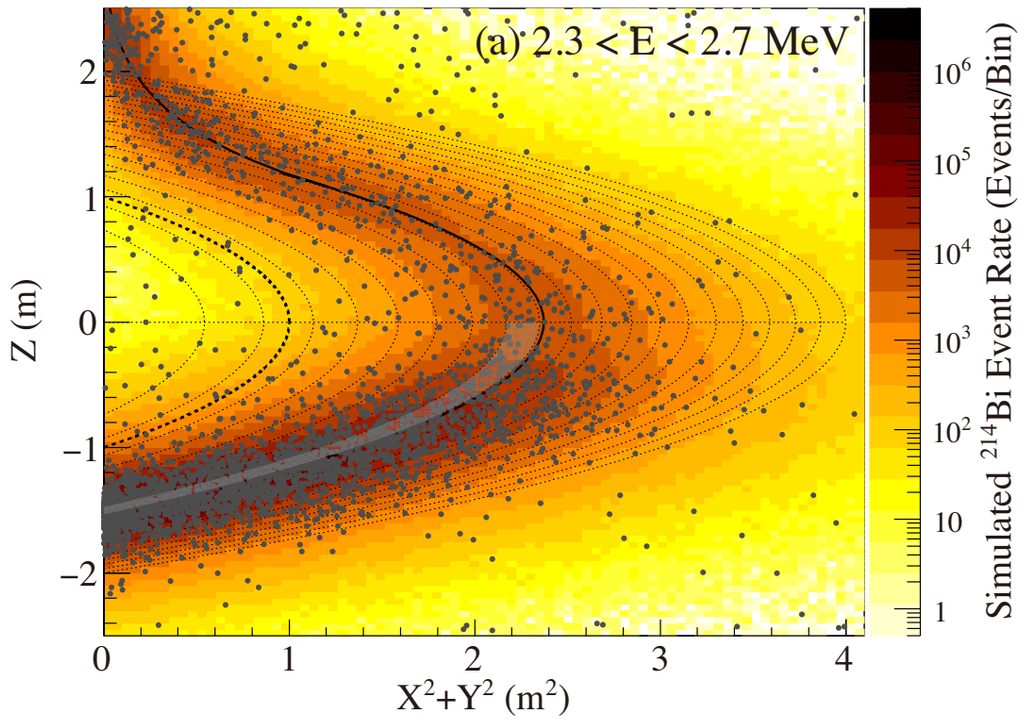


$\langle m_{\beta\beta}\rangle$ < 61-165 meV

100 meV以下の探索に到達!

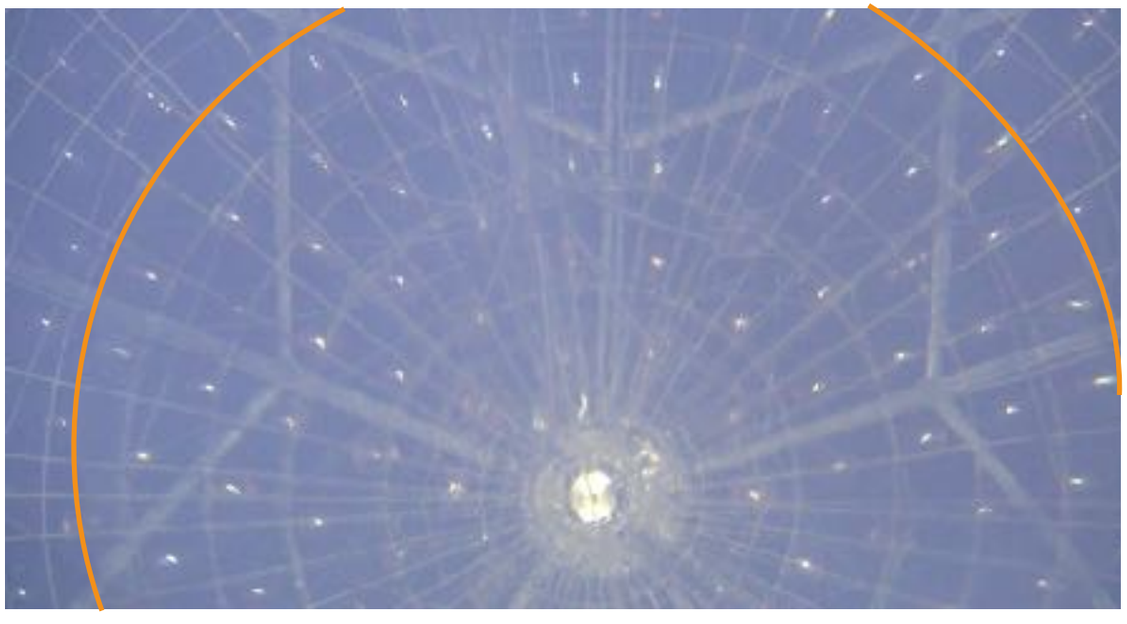
PRL 117, 082503 (2016)

KamLAND-Zen 800



KamLAND-Zen 800 を準備中

- 750 kgのキセノンを使用
- 新しい内部バルーン (半径 1.54 m → 1.92 m)
- フィルムの放射性不純物が最大のノイズ事象源
  - 埃を集める静電気のコントロール
  - 製作途中のフィルムカバー
  - １度きたらクリーンスーツはクリーニングへ
- 予測感度は 50 meV 程度



昨年のインストール

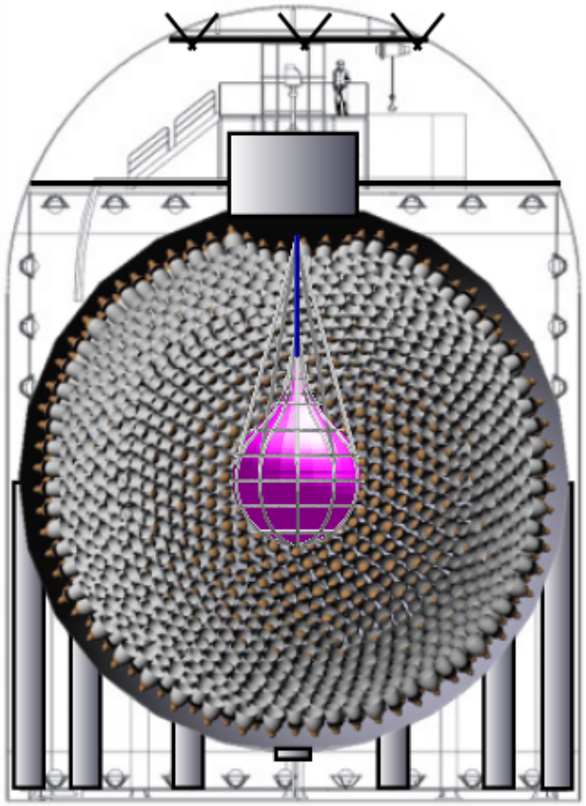
- 夏に内部バルーンの設置、キセノンを溶かしていない液体シンチレータの送液、バルーンのクリーン度の測定まで完了
- Zen 400 よりも綺麗なバルーンである事を確認済
- しかし、リークが見つかったため、秋にバルーンを引き上げた

KamLAND-Zen 800

引き上げたバルーンは再使用できないため、現在新しいバルーンを製作中

将来計画

KamLAND2-Zen



各ノイズ事象を抑える改良

- 2vββからのtail (光量の増加で分解能向上)

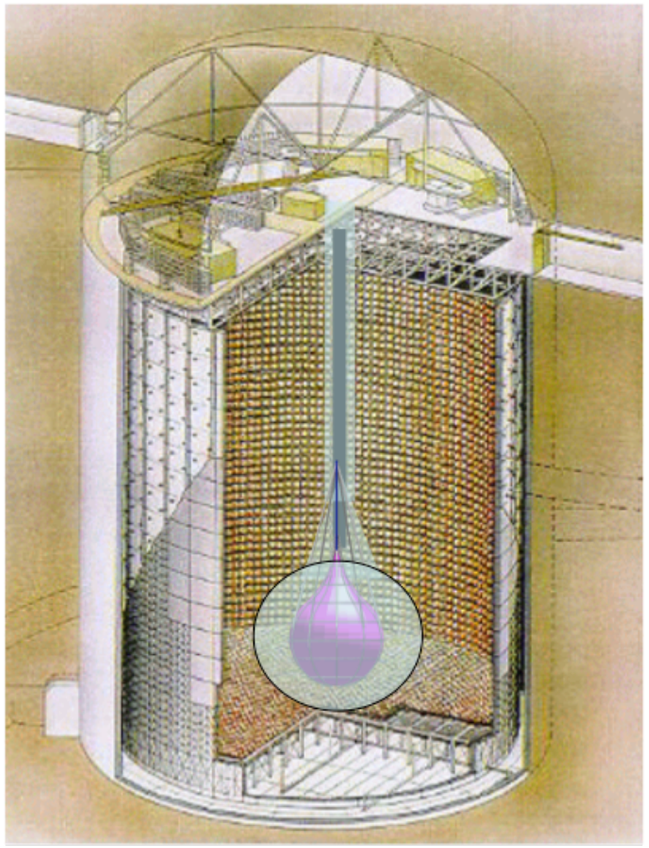
  高発光LS、高量子効率PMT、集光ミラー、etc.

- フィルム内の放射能(発光フィルムの導入)

- γなどの環境放射能(イメージング検出器によるPID)

逆階層構造領域のほぼ全域の探索を目指す

Super-KamLAND-Zen



バルーンを深く沈める

- 圧力が高い＝キセノンがよく溶ける

- 体積に比例するノイズ事象を抑えてた上で

  崩壊核を増やせる

正常階層構造領域の探索を目指す

まとめ

- 現在のところ、ニュートリノ質量に関係する地上実験は、
  - 階層構造を調べる実験
  - 絶対質量を調べる実験
  - マヨラナニュートリノ質量を調べる実験

  に分かれている。
- それぞれの実験で異なる技術を駆使し、上記を明らかにしようとしており、開発段階から稼働実験まで様々な状況にある。
- カムランド禅はニュートリノを伴わない二重β崩壊探索実験で、現在のところ世界最高感度でニュートリノ質量に制限を加えている。さらにキセノン750kgを用いたKamLAND-Zen 800の開始に向け、プロジェクトを進めている。