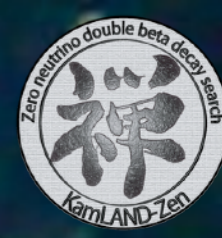




東北大学



計画研究A01: 逆階層領域でのニュートリノの マヨラナ性の研究

東北大学ニュートリノ科学研究センター
井上邦雄

<http://www.awa.tohoku.ac.jp/>

A01:研究目的

「物質はどこから来たのか？」

- ・ KamLAND-Zen 800 の低バックグラウンド化

宇宙線による原子核破砕バックグラウンドを低減するための新型電子回路を導入し、40meVの感度を目指す。

- ・ KamLAND2-Zen に向けた準備

高エネルギー分解能化のための技術開発。
クリーン環境の整備。

「どのように地球に行き着いたのか？」

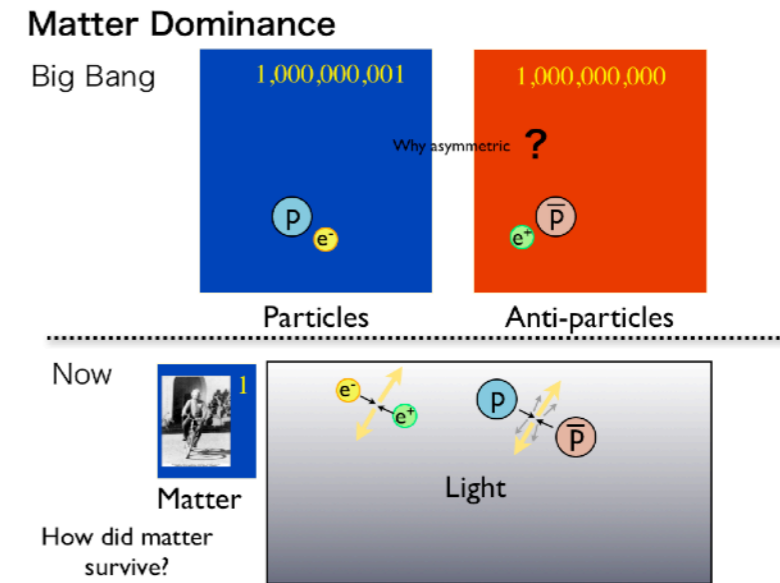
- ・ KamLAND での地球ニュートリノ観測

安定的な性能の維持と長期観測。

関連する宇宙・素粒子の大問題

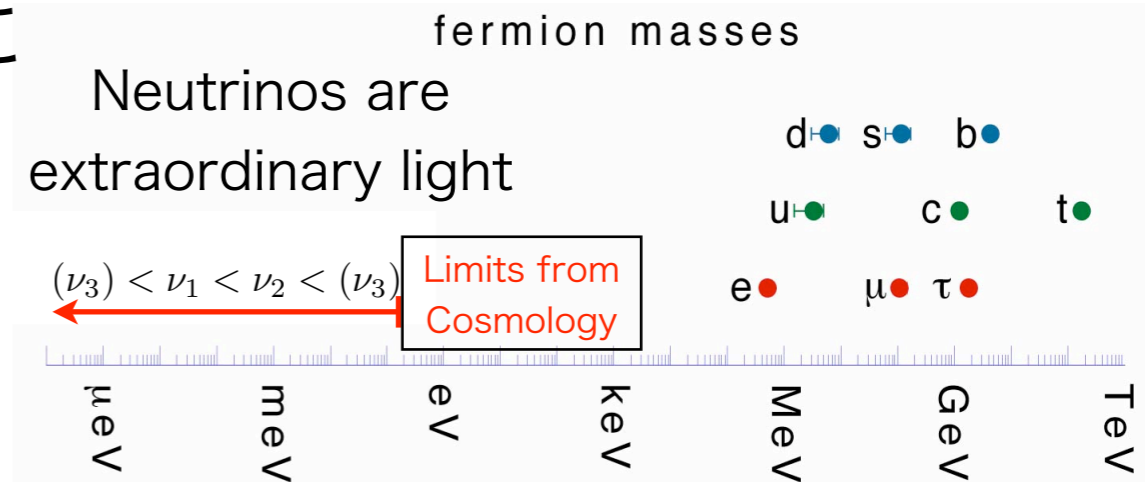
「無から生じた宇宙になぜ物質は存在するのか？」

重い右巻きニュートリノ (N_R) があれば
レプトジェネシスが可能



「なぜニュートリノだけ桁外れに軽い質量を持つのか？」

N_R があればシーソー機構が可能



「暗黒物質の起源は？」

N_R があれば・・・

N_R を作るのはどうやら無理なようだ。

N_R 存在の傍証になることはなんだろう？

Dirac vs. Majorana

Discovery of neutrino mass requires right-handed composition.

e	LH electron (e^-_L)	RH electron (e^-_R)
	LH positron (e^+_L)	RH positron (e^+_R)

Matter particle (Fermion) has at least 4 components.

It is naturally derived from quantum mechanics and special relativity (Dirac equation).

ν	LH ν_L	RH $\nu_R (N_R)$ not discovered
	LH $\bar{\nu}_L (\bar{N}_L)$ not discovered	RH $\bar{\nu}_R$

Dirac neutrino



$$\nu_L \quad \underbrace{\nu_R \quad \bar{\nu}_L}_{\text{unobservable}} \quad \bar{\nu}_R$$

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

Majorana neutrino (1937)

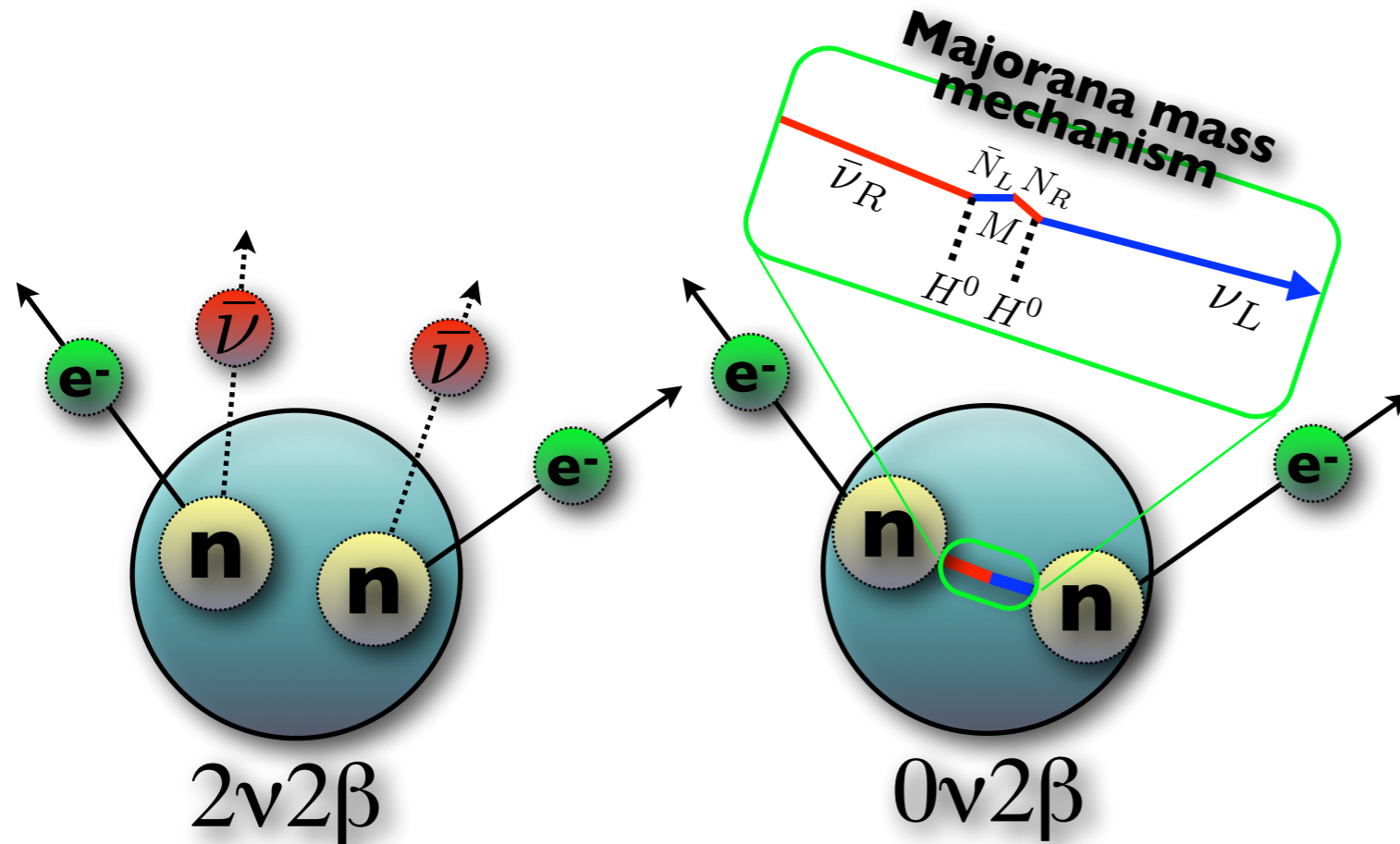


$$\nu_L \quad \bar{\nu}_R \quad \underbrace{\bar{N}_L \quad N_R}_{\text{just heavy}}$$

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

Majorana neutrino violates Lepton #.

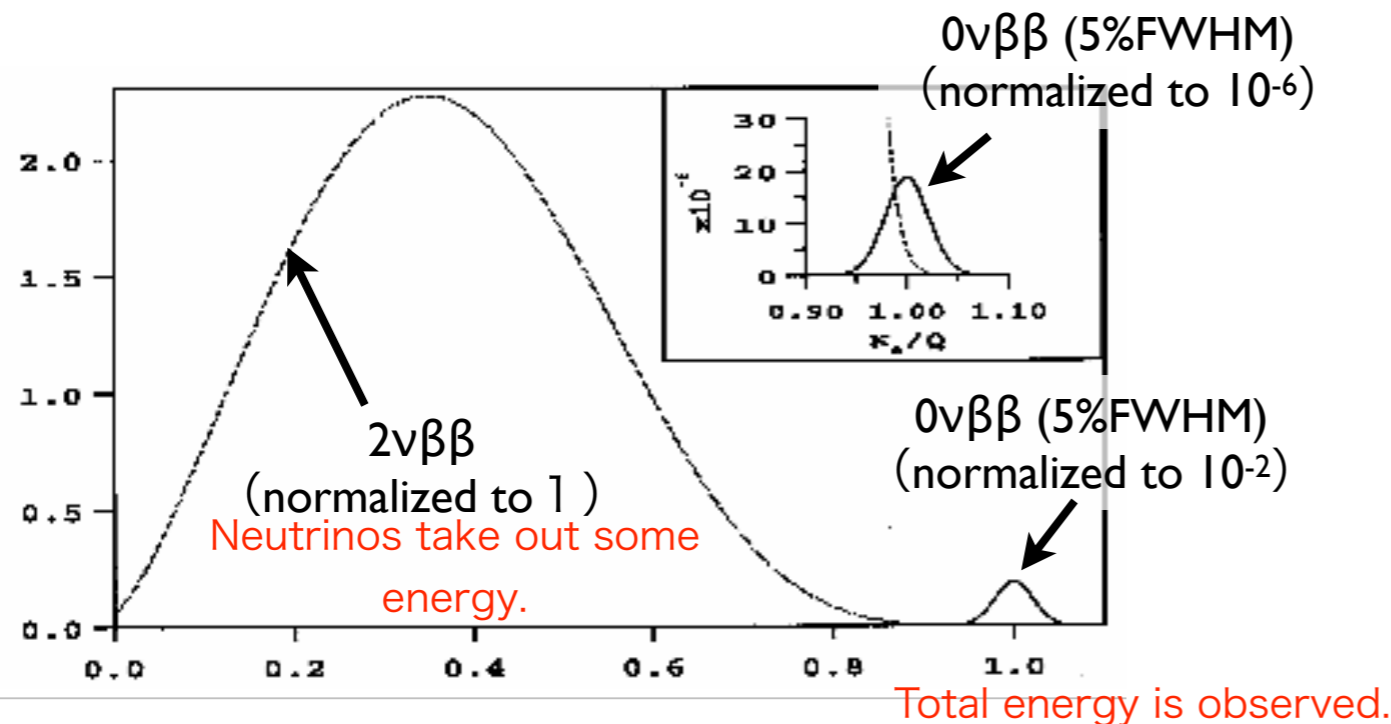
If neutrinos are Majorana,
neutrino-less double beta decay ($0\nu 2\beta$) can happen.



theoretical history

- 1930 light neutral particle (W.Pauli)
- 1933 β decay theory (E.Fermi)
- 1935 $2\nu 2\beta$ (M.Goeppert-Mayer)
- 1937 Majorana neutrino (E.Majorana)
- 1939 $0\nu 2\beta$ (W.H.Furry)

W.Pauli E.Fermi M.Goeppert-Mayer E.Majorana W.H.Furry



Larger the mass, easier to observe $0\nu 2\beta$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum m_i |U_{ei}|^2 \epsilon_i \right|$$

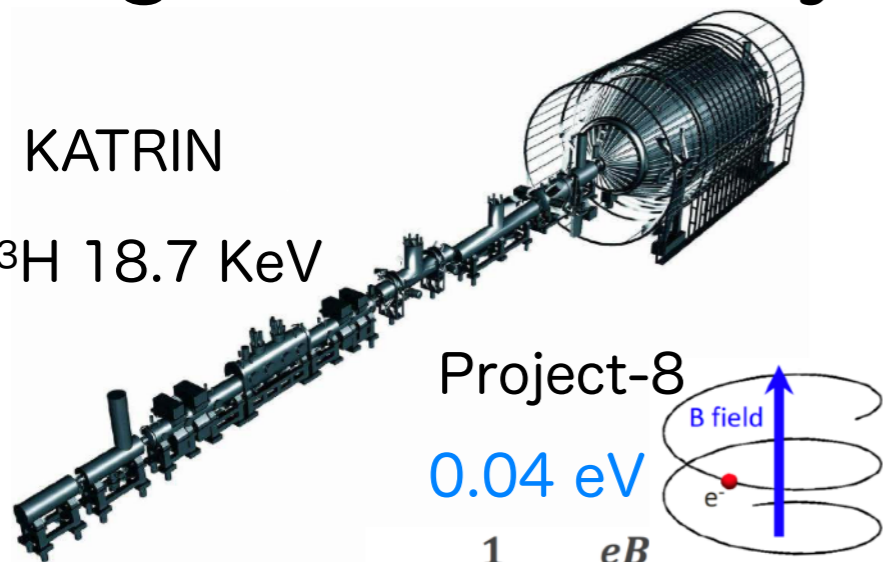
$$\frac{1}{T_{1/2}} = G_{0\nu} |M_{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

Majorana CP

Single beta decay

KATRIN

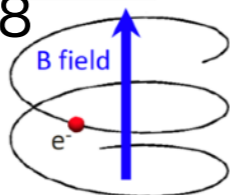
^3H 18.7 KeV



Project-8

0.04 eV

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



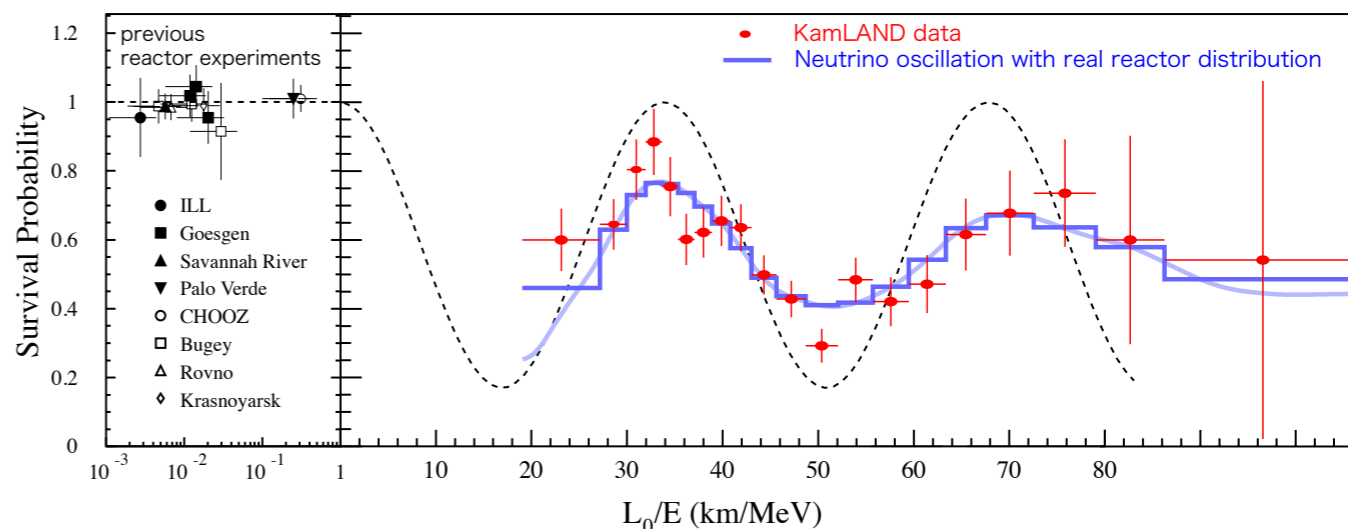
$$\langle m_\beta \rangle^2 = \sum m_i^2 |U_{ei}|^2$$

current limit
< 1.1 eV

future sensitivity
0.2 eV

Neutrino oscillation

solar, reactor, atmospheric, accelerator



$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$$

precise measurements

$$\delta m^2 = (7.20 - 7.51) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$M > 0.06 \text{ eV}$ (NO)

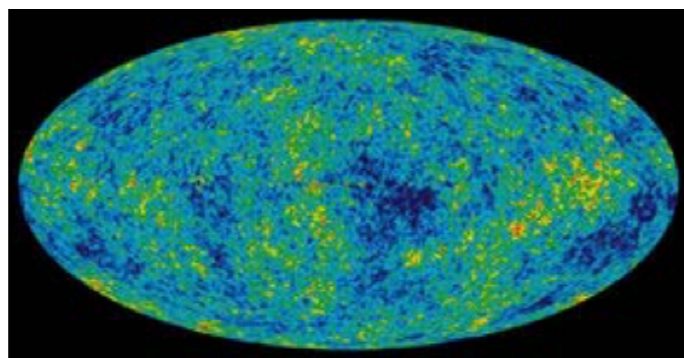
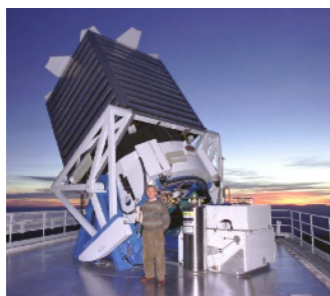
$$|\Delta m^2| = (2.43 - 2.51) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$M > 0.1 \text{ eV}$ (IO)

m_ν

Cosmology

CMB satellite, galaxy survey, weak gravitational lensing,...



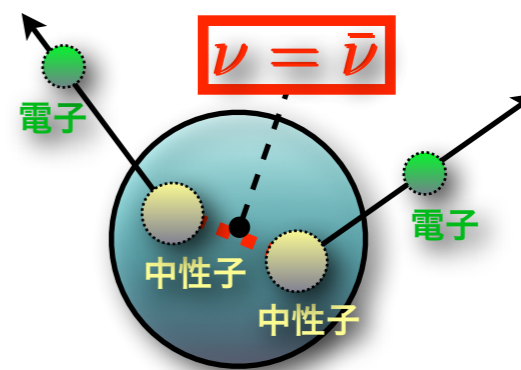
$$M = \sum m_i$$

< 0.12~0.77 eV
depends on dataset

future precision
0.03 eV

Double beta decay

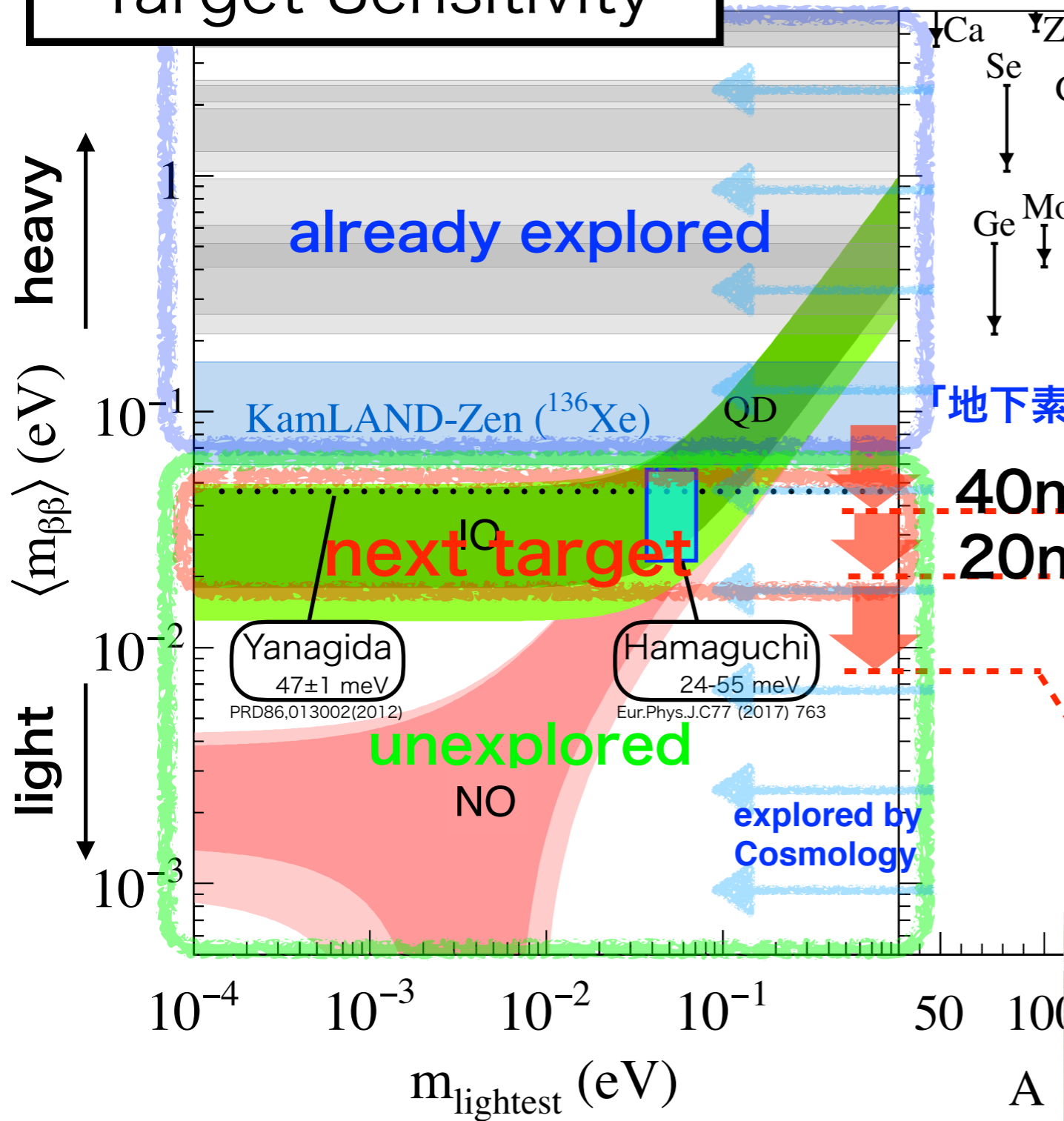
Ge, Te, Mo, Cd, Ca, Xe, Se,



$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum m_i |U_{ei}|^2 \varepsilon_i \right|$$

< ~ 0.1 eV 0.01~0.03 eV

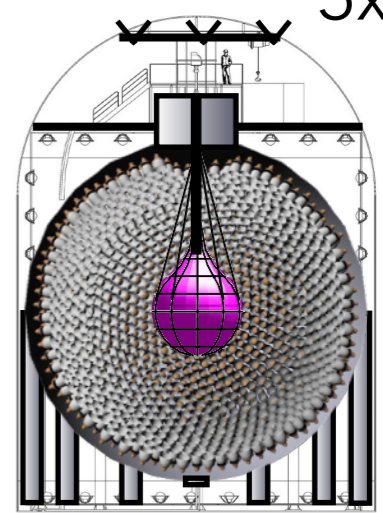
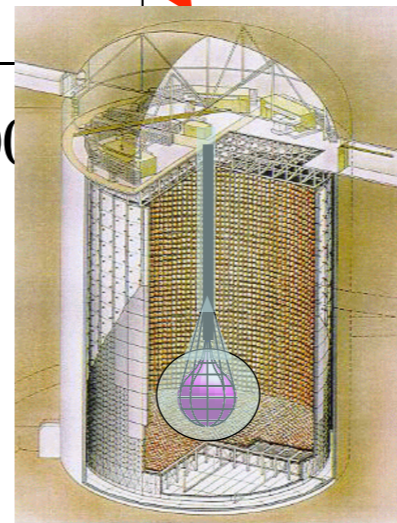
Target Sensitivity



「地下素核」での実績
40meV
20meV



low BG film, 750 kg xenon
KamLAND-Zen 800
 5×10^{26} y (5y)

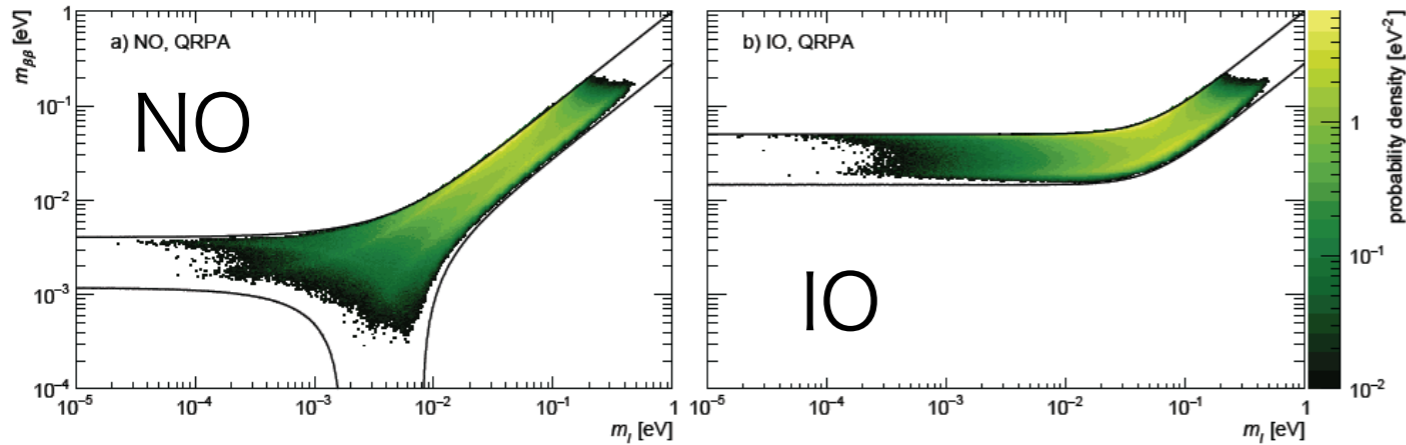


better σ_E
scintillator film
KamLAND2-Zen
 2×10^{27} y (5y)

The discovery may be just around the corner.
KamLAND-Zen is the top runner.

NO vs IO

Posterior distribution



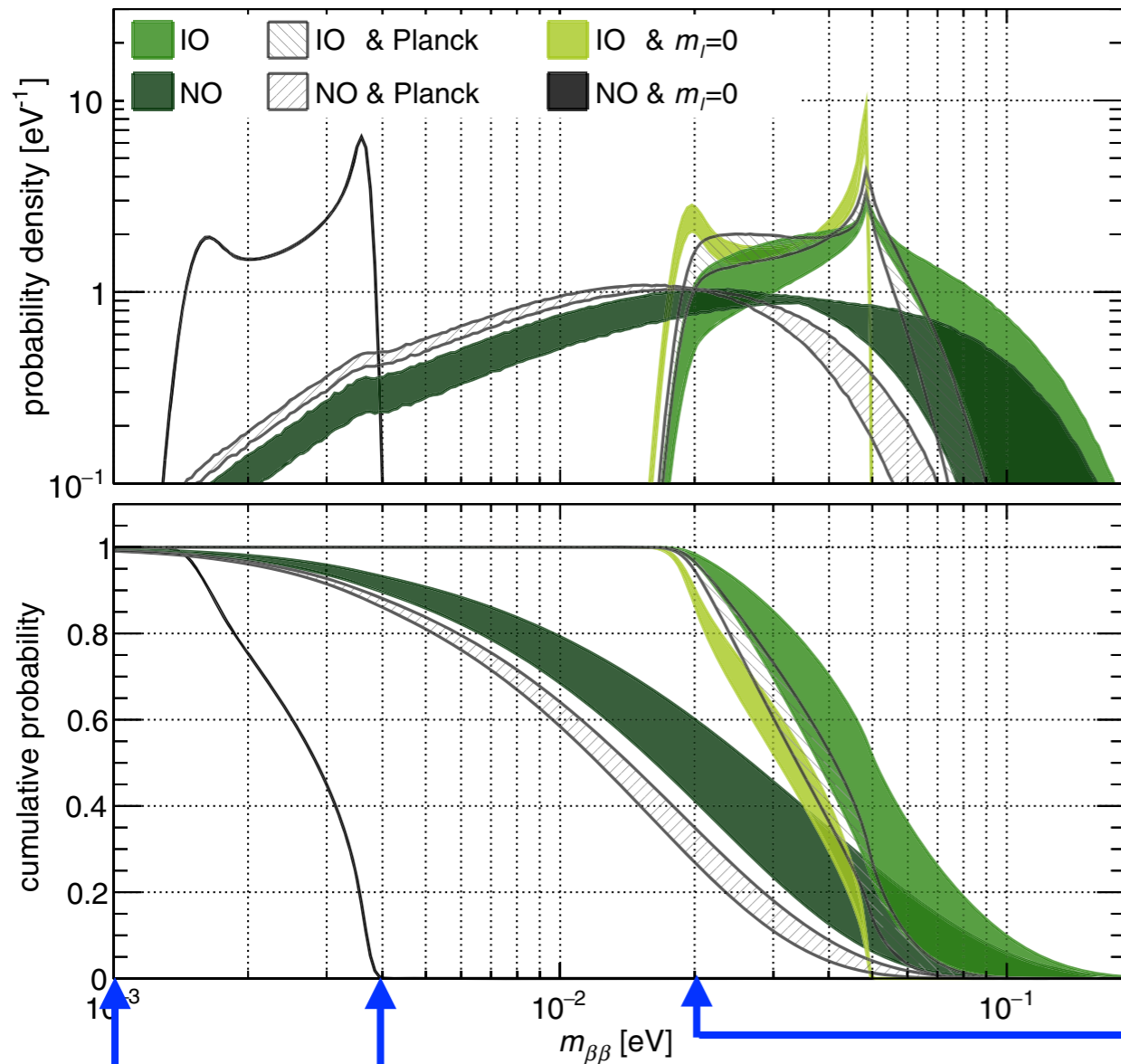
Prior choice

PRD96,053001 (2017)

$$\underbrace{\{\Sigma, \Delta m_{21}^2, \Delta m_{31}^2 \text{ or } \Delta m_{23}^2, \theta_{12}, \theta_{13}, \alpha_{21}\}}_{\text{logarithmic}} \underbrace{, (\alpha_{31} - \delta)}_{\text{flat}}$$

Likelihood test

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \mathcal{L}(\mathcal{D}_{\text{osc}} | \Delta m_{21}^2) \cdot \mathcal{L}(\mathcal{D}_{\text{osc}} | \Delta m_{31}^2 / \Delta m_{23}^2) \\ & \cdot \mathcal{L}(\mathcal{D}_{\text{osc}} | s_{12}^2) \cdot \mathcal{L}(\mathcal{D}_{\text{osc}} | s_{13}^2) \\ & \cdot \mathcal{L}(\mathcal{D}_{\text{Troitsk}} | m_{\beta\beta}) \cdot \mathcal{L}(\mathcal{D}_{0\nu\beta\beta} | m_{\beta\beta}) \end{aligned}$$



Large coverage of the parameter space

40meV covers >50% of IO

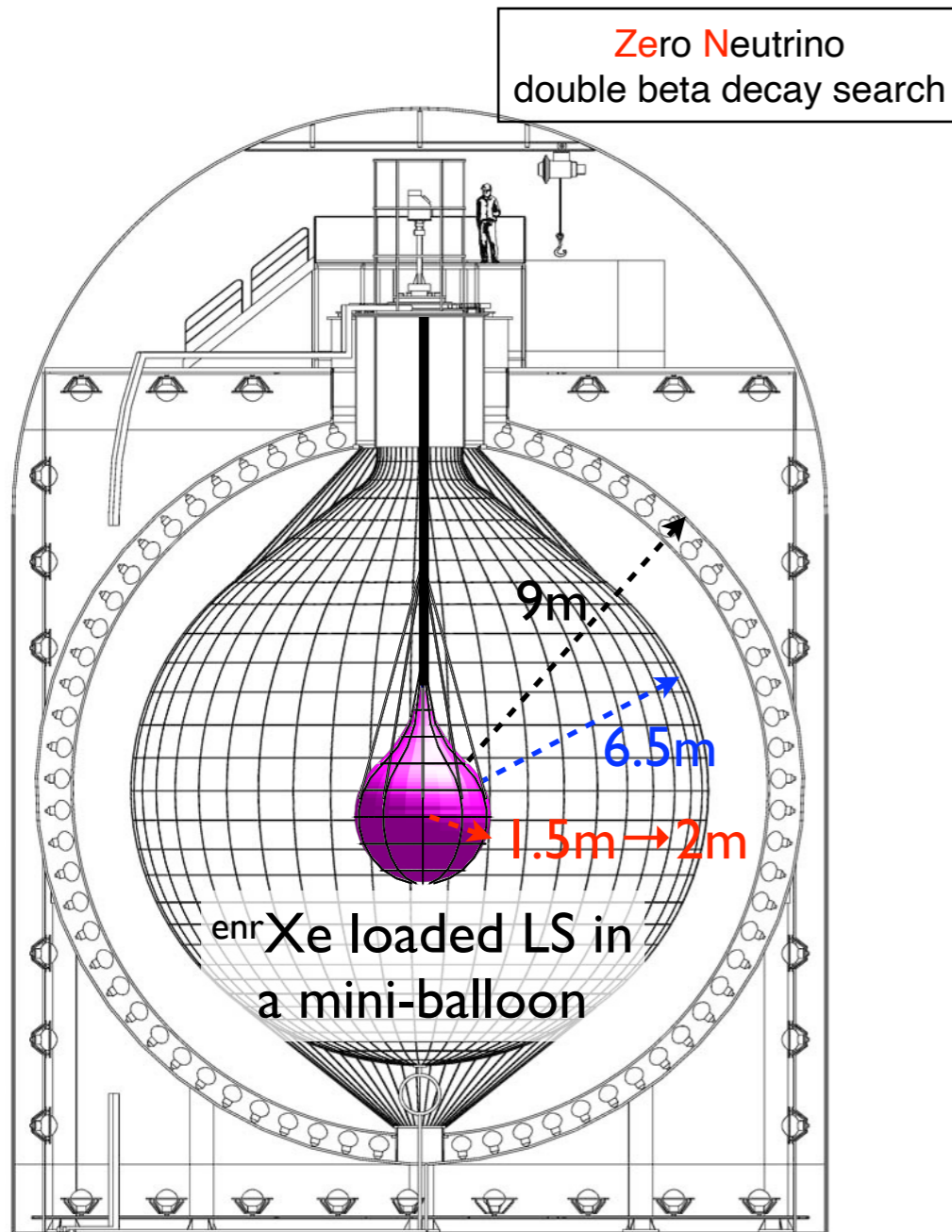
20meV covers 95% of IO and 50% NO

No coverage above 4meV, if NO & m_min=0.

1meV

We chose ^{136}Xe as it can be loaded in LS up to ~3 wt%.

KamLAND-Zen



^{136}Xe

Noble gas

Centrifugal enrichment possible

$Q_{\beta\beta} = 2459 \text{ keV}$

(below ^{208}Tl 3198-5001 keV)

Advantages of using KamLAND

- ① low cost and quick start
(running detector)
- ① BG can be identified
(full active thick shielding)
- ② In-situ purification possible
(liquid media)
- ③ On/Off measurements possible
(xenon is removable)
- ④ multi-purpose
(geo-neutrino)
- ⑤ easily scalable
(mini-balloon)

90% enriched ^{136}Xe

320kg for phase-I

380kg for phase-II

745kg for Zen 800 (started in Jan. 2019)

largest amount so far

KamLAND(-Zen) collaboration

Japan

Tohoku University, RCNS
University of Tokyo, Kavli IPMU
Osaka University
Tokushima University
Kyoto University

US

University of California Berkeley
University of Tennessee
Triangle University Nuclear Laboratory
University of Washington
Massachusetts Institute of Technology
Virginia Polytechnic Institute and State University
University of Hawaii
Boston University

Netherland

Nikhef, University of Amsterdam

※ Second affiliation is not listed.

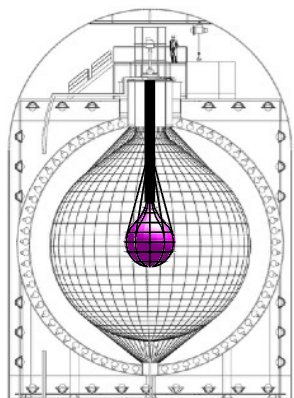


Collaboration meeting @MIT

~50 physicists gradually growing

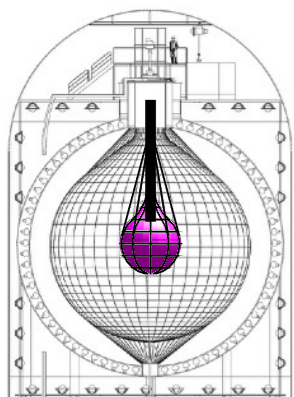
Timeline of KamLAND-Zen

KamLAND-Zen 400



地下素核

KamLAND-Zen 800



地下宇宙

2011

MIB production

MIB installation, xenon installation

2012

400 phase 1

320kg

Filtration

Xenon extraction

LS purification

Recovery from fire

Fire

2013

LS purification

Xenon installation

2014

400 phase 2

380kg

2015

MIB

production

Calibration, xenon extraction, MIB extraction

2016

OD refurbishment

MIB production

MIB installation, characterization

Leak

Welding improvement

MIB extraction, hole inspection

2017

MIB production

2018

LS purification

Xenon installation

MIB installation, characterization

2019

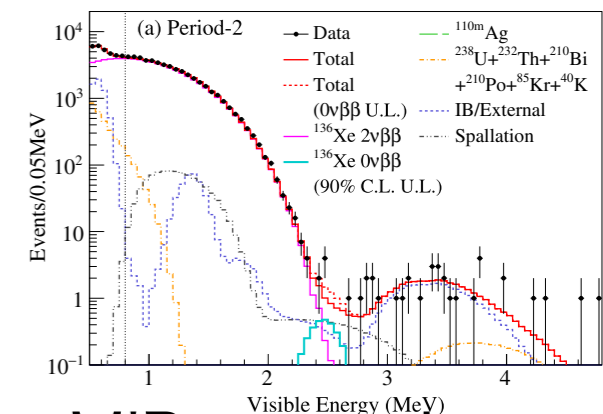
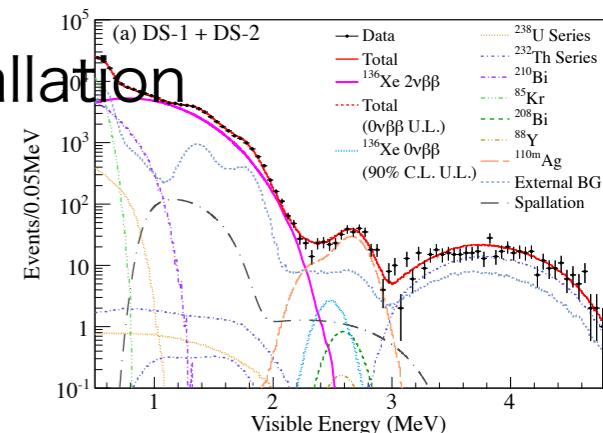
Zen 800

745kg

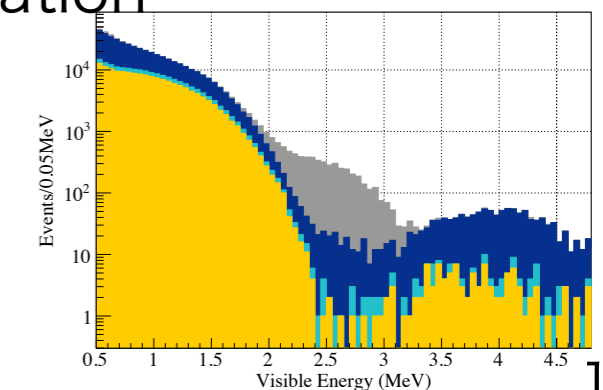
TAUP2019 very preliminary results

We are here

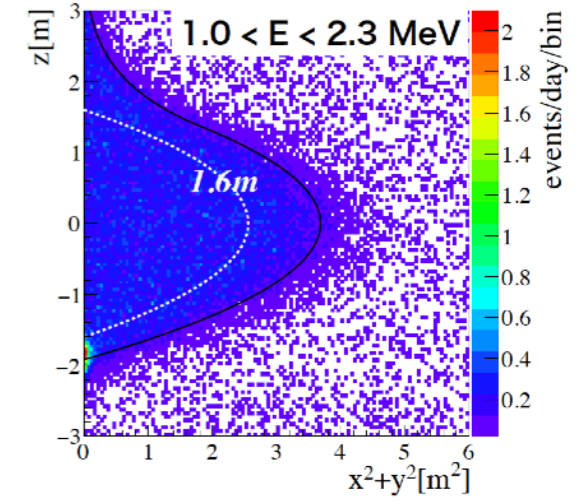
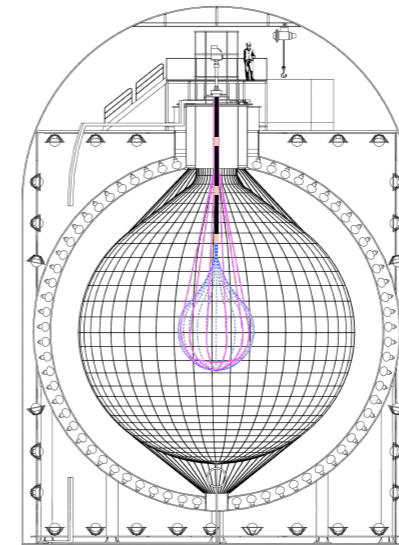
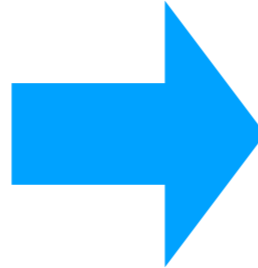
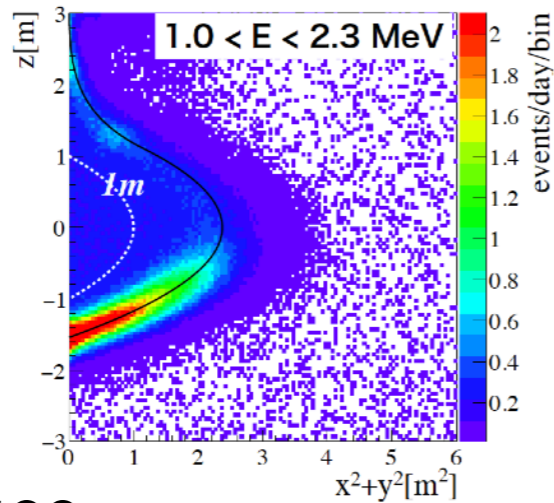
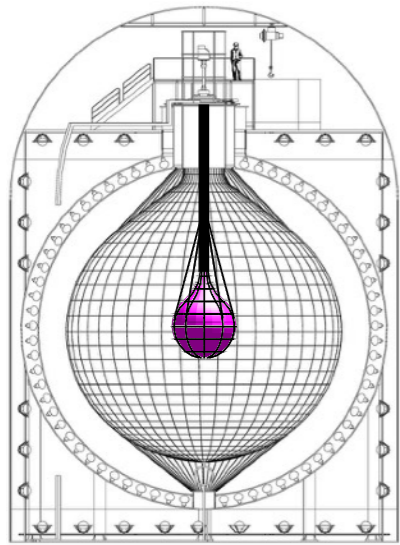
論文未投稿なので定量的な議論は避けます。



1/10 BG
2x ^{136}Xe , 3x FV



Status of Zen 800

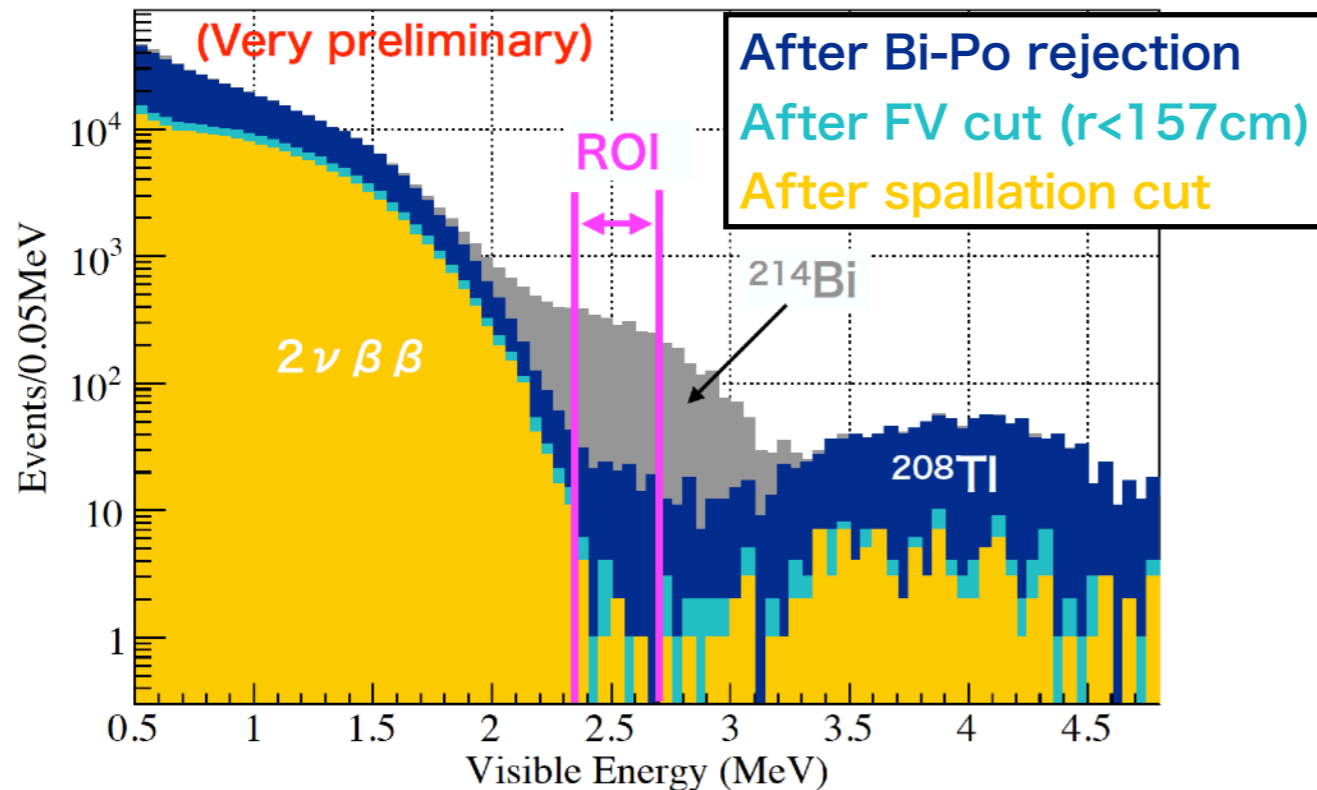


KamLAND-Zen 400
 Xenon loading **320-380kg**
 2011-2015

KamLAND-Zen 800
 Xenon loading **745kg**
 January 22, 2019-

**Mini-balloon is
 10 times cleaner!**

KamLAND-Zen 800 preliminary analysis has been done. (132.7 live-days)



presented at TAUP2019

obtained limit

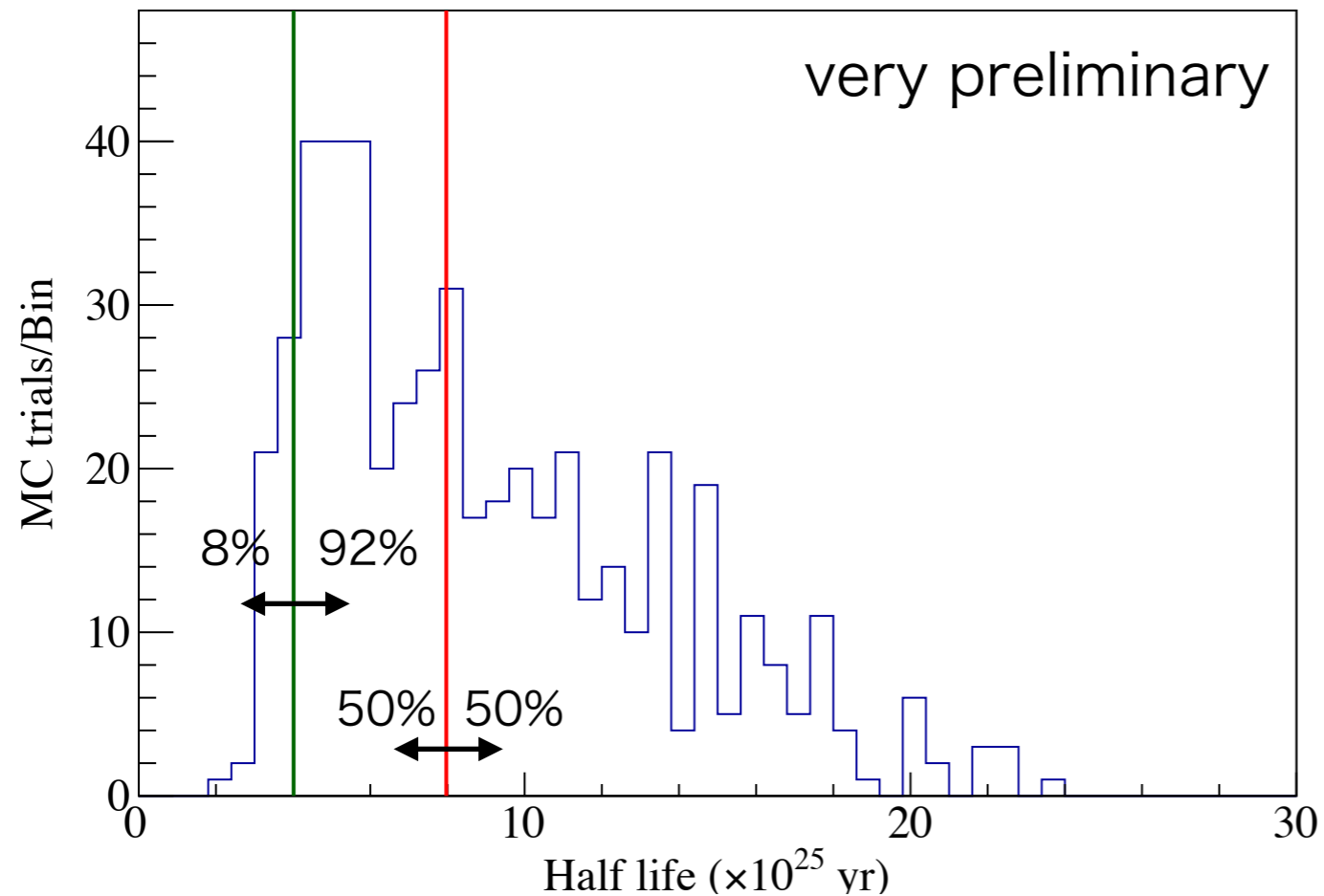
$$T_{1/2}^{0\nu} > 4 \times 10^{25} \text{ yr}$$

is catching up the previous limit

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.07 \times 10^{26} \text{ yr}$$

Obtained limit vs estimated sensitivity

Zen 800 obtained limit 4×10^{25} yr (this was rather unlucky)
estimated sensitivity (median) 8×10^{25} yr



Comparison with Zen 400

Zen 400 sensitivity

5.6×10^{25} yr

(400, 747.9 days) (213.4+534.5)



Zen 800 sensitivity

8×10^{25} yr

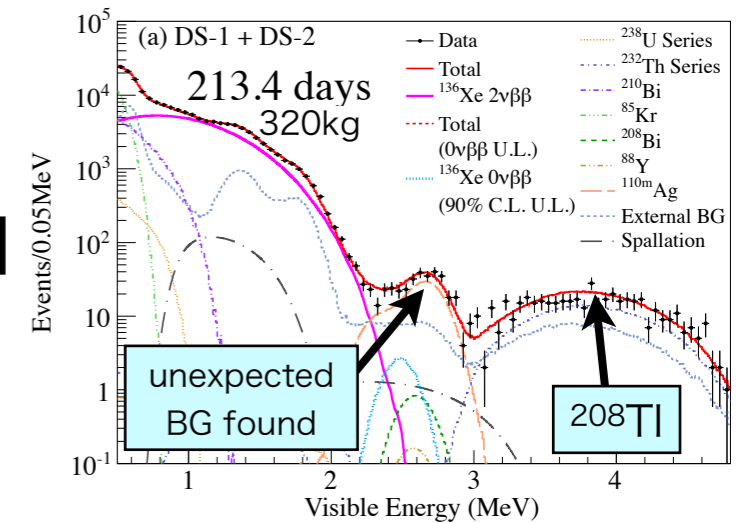
(800, 132.7 days)

presented at TAUP2019

**KLZ800 sensitivity already
surpassed KLZ400 sensitivity!**

Two possibilities:

- Radioactive impurities should be long-lived.
- Cosmogenic spallation nuclei at the underground should have time-correlation with muons.



thousands of

millions of

All nuclei and decay path in the **ENSDF** have been surveyed.

<http://ie.lbl.gov/databases/ensdfserve.html>

Study on time-correlation limits nuclei w/ <100 sec lifetime should be <0.007 /ton·day (90% CL). → small

Nuclei w/ 100sec~30days are rejected from the study of energy spectrum w/ close A,Z nuclei. → negligible

Nuclear reactions (α , γ), (α , $\alpha\gamma$), (n , γ) have small cross sections

→ negligible

Only 4 nuclei w/ more than 30 days and peak around 0v remained.

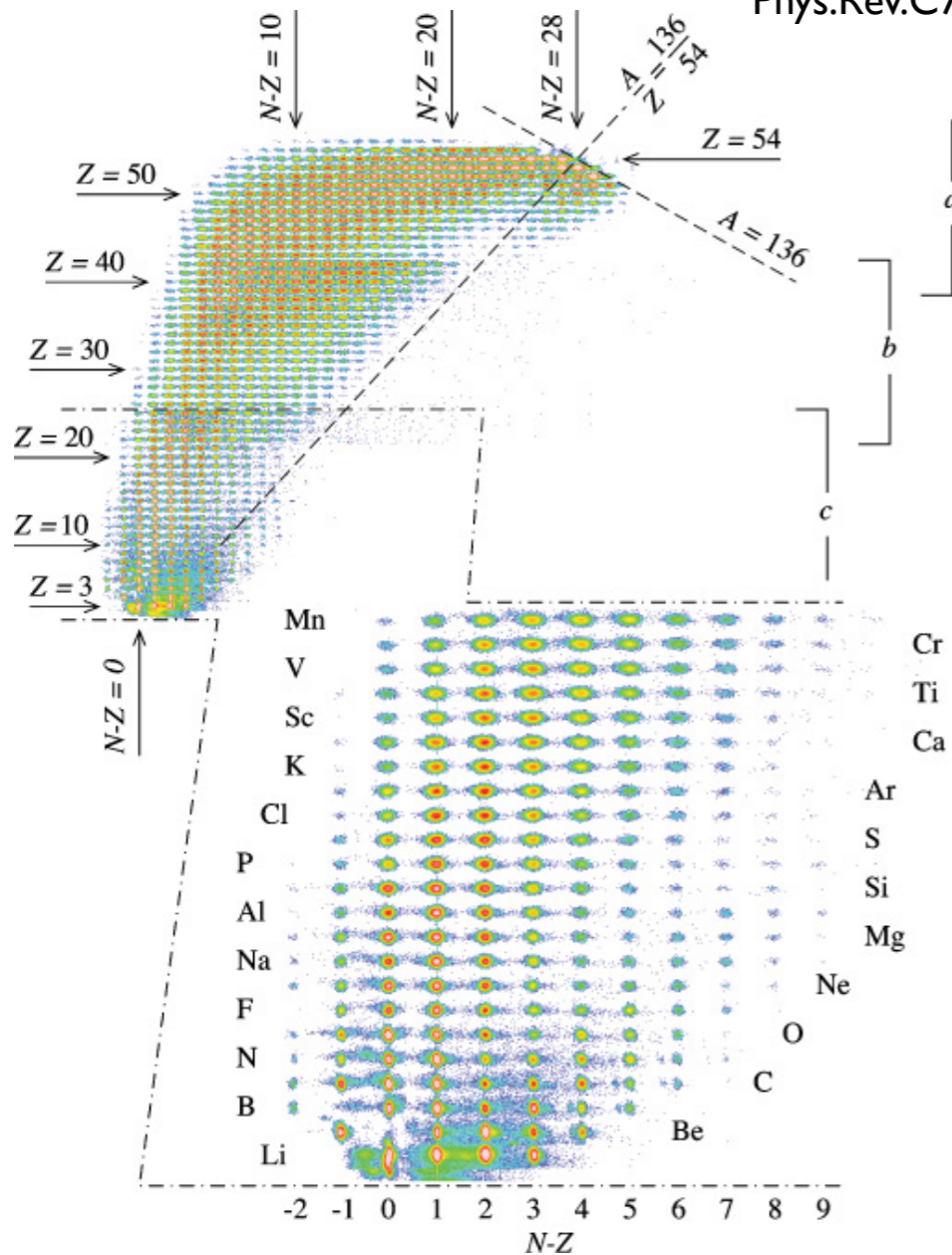
^{110m}Ag ($T_{1/2}=250\text{d}$), ^{208}Bi ($3.68 \times 10^5\text{y}$), ^{88}Y (107d), ^{60}Co (5.27y)

- ・ エネルギースペクトル、崩壊時定数から ^{110m}Ag と決着
- ・ $^{134,137}\text{Cs}$ との比からほぼ福島原発起源と判断

BG from spallation

Spallation products from ^{136}Xe measured with 1 GeV proton equivalent beam

Phys.Rev.C76,064609(2007)



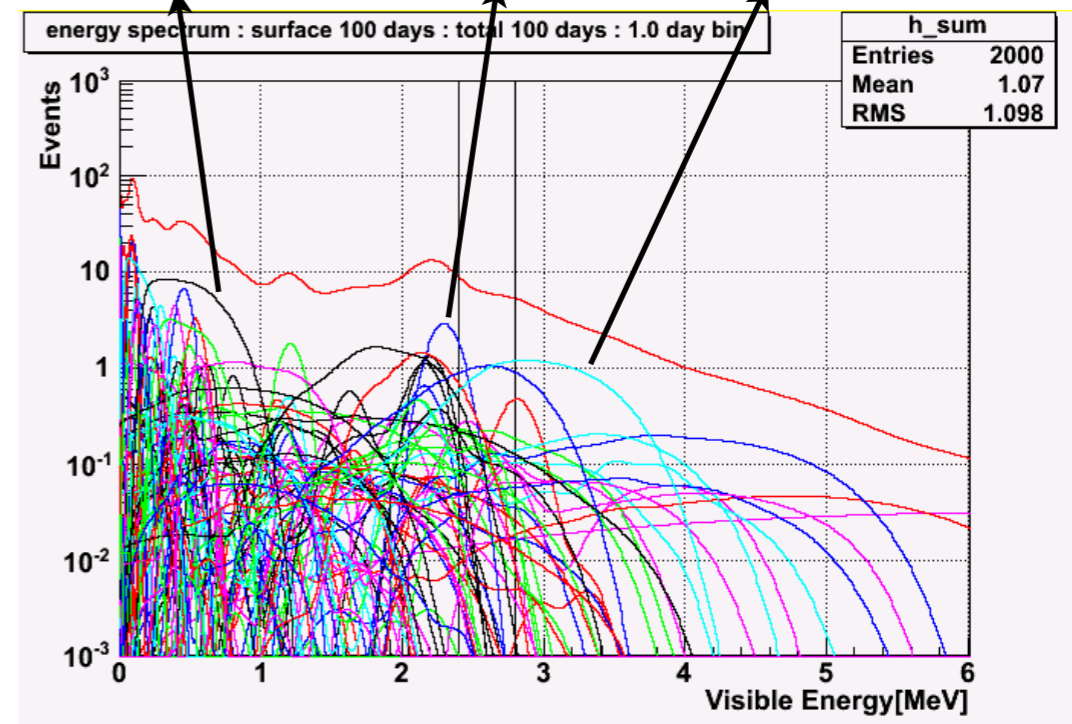
GEANT4 reproduces the production rate satisfactory well for an order estimation.

Spallation at the underground site is very small.

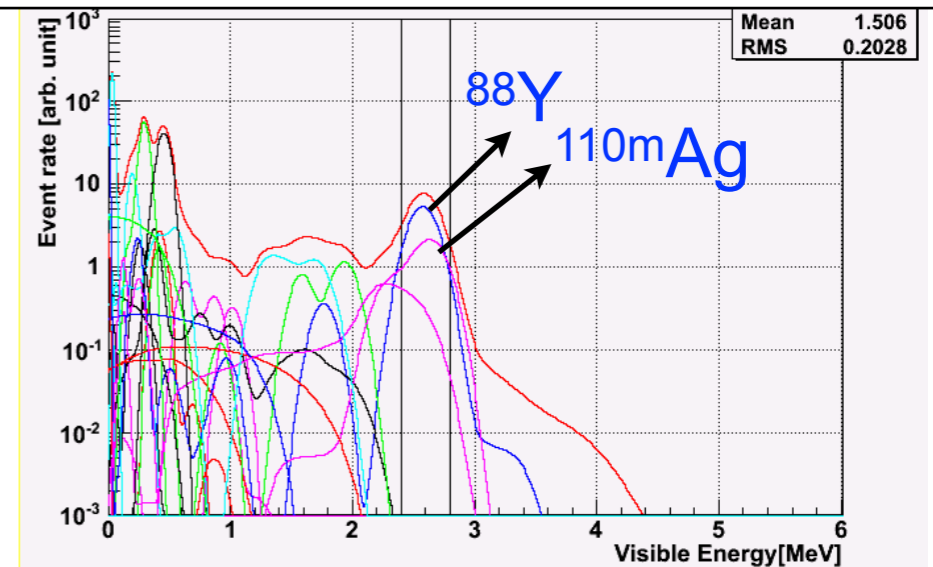
(GEANT4) consideration with the sensitivity at that time

100 days on the surface, 0 day in the mine

β^- : ^{135}Xe 54.7mb, $T_{1/2}=9.14\text{h}$ $\beta+EC$: $^{118\text{m}}\text{Sb}$ 13.3mb, $T_{1/2}=5.0\text{h}$ β^- : ^{134}I 21.9mb, $T_{1/2}=52.5\text{m}$



100 days on surface, 300 days in the mine

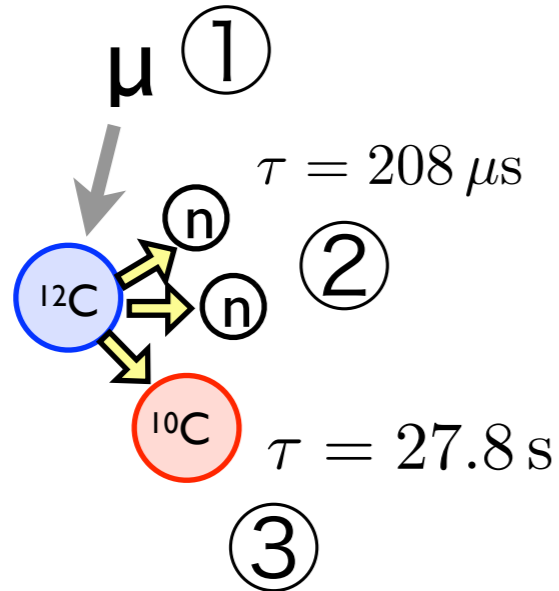


Estimated ^{110}Ag production rate (aboveground) is $\sim 30/\text{day}/400\text{kg-}^{136}\text{Xe}$

Measured BG rate (underground) is $\sim 3/\text{day}/300\text{kg-}^{136}\text{Xe}$

バックグラウンド低減で、まず長寿命の ^{10}C ($T_{1/2}=19.3$ 秒) が問題に

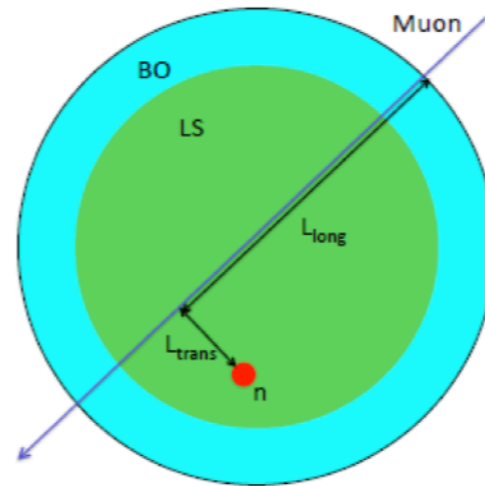
1. neutron tag



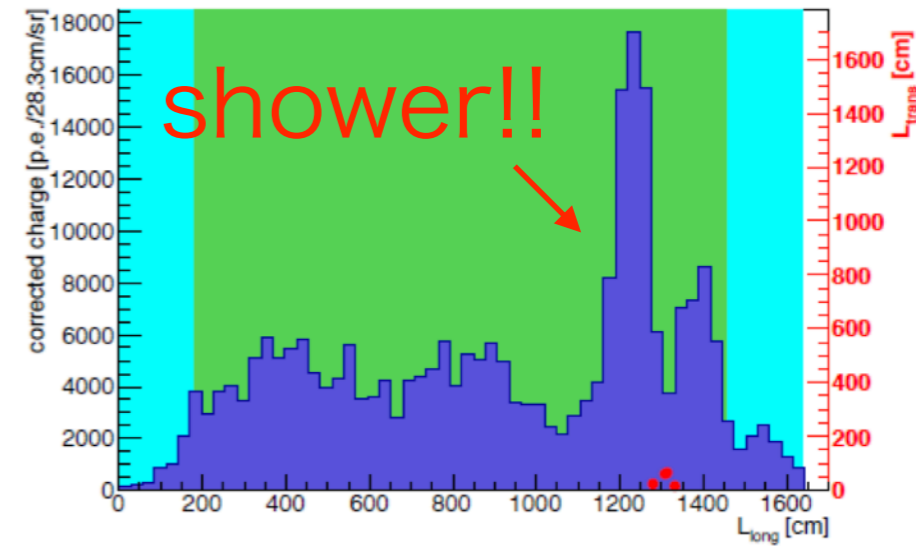
better n-tagging with **new electronics**

^{10}C rejection : ~99%
to be installed from Zen 800

2. shower tag



energy deposition along muon track



It doesn't require neutron tagging and applicable to all data.

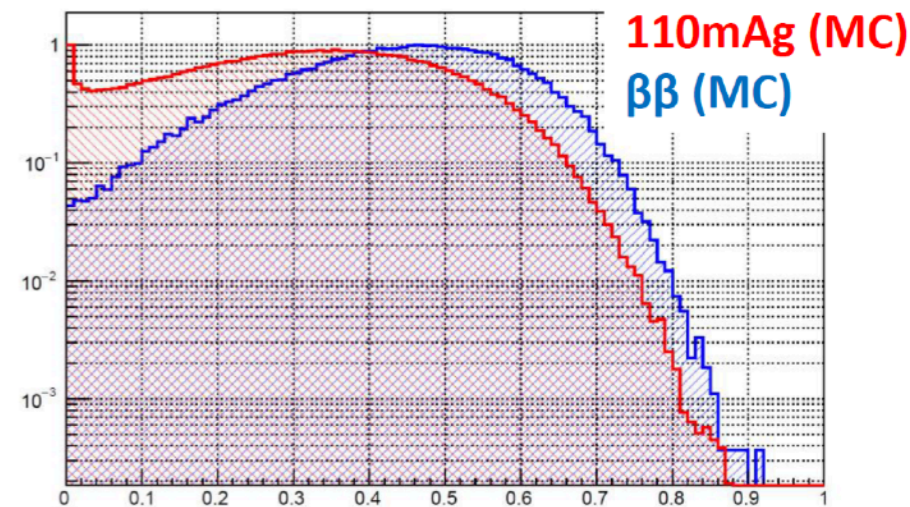
tuning by 蜂谷

3. β / γ discrimination using hit timing spread due to multi-vertex of γ events neural net PID

performance : ~55% ^{10}C reduction (@20% inefficiency)

applicable to most γ , $\beta + \gamma$ BGs, such as ^{214}Bi , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, $^{212}\text{Bi-Po}$ pileup, ^{60}Co

$\beta\beta$ class



Softmax output

長寿命の ^{10}C ($T_{1/2}=19.3$ 秒) が除去が進むと、 ^{136}Xe 破砕によるもっと長寿命の核が問題に
 (ちなみに、 $2\nu 2\beta$ tail, solar ν は今は諦めている。)

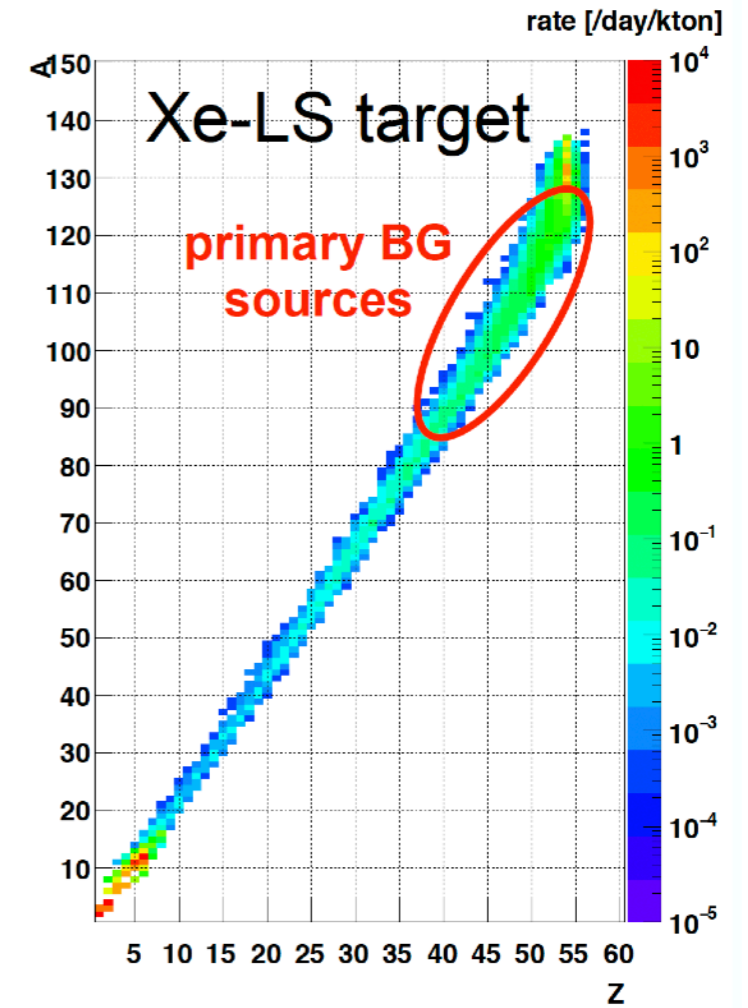
●原子核破砕のシミュレーション FLUKA 家城

PRC76,064609(2007) 1 A GeV ^{136}Xe beam
 Nucl.Phys.A899(2013)116-132 500 A MeV ^{136}Xe beam
 KamLAND LS data
 で検証

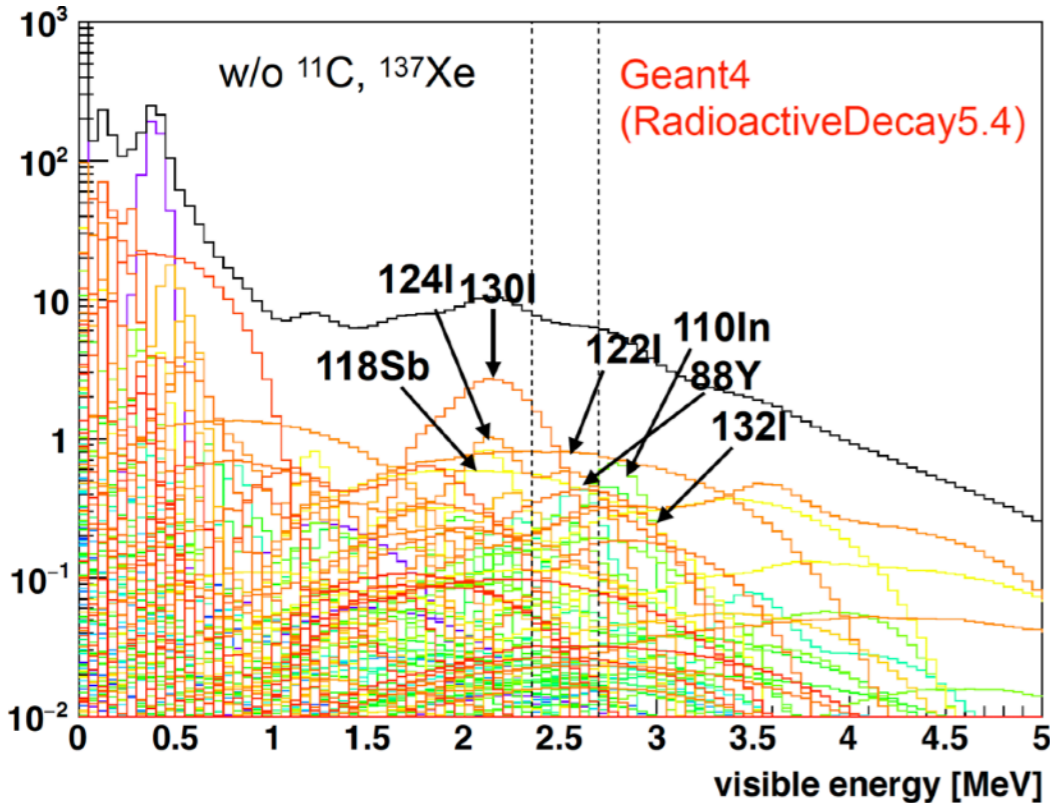
metastable の生成が不明なので系統誤差に

●破砕核のトレース GEANT4 (=ENSDF) 市村 (清水)

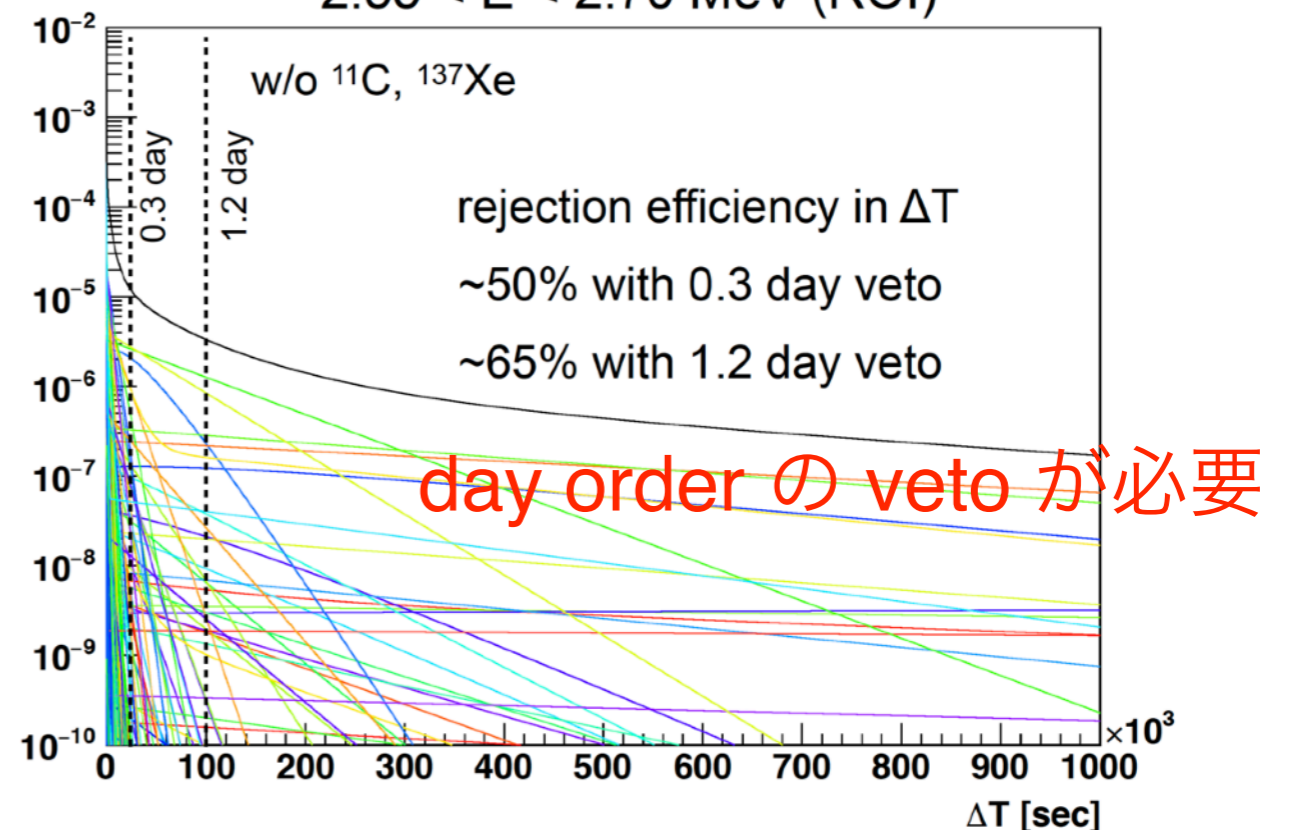
GEANT4のテーブルの問題は手作業で修正



2000日後 (放射平衡) のエネルギースペクトル



$2.35 < E < 2.70$ MeV (ROI)

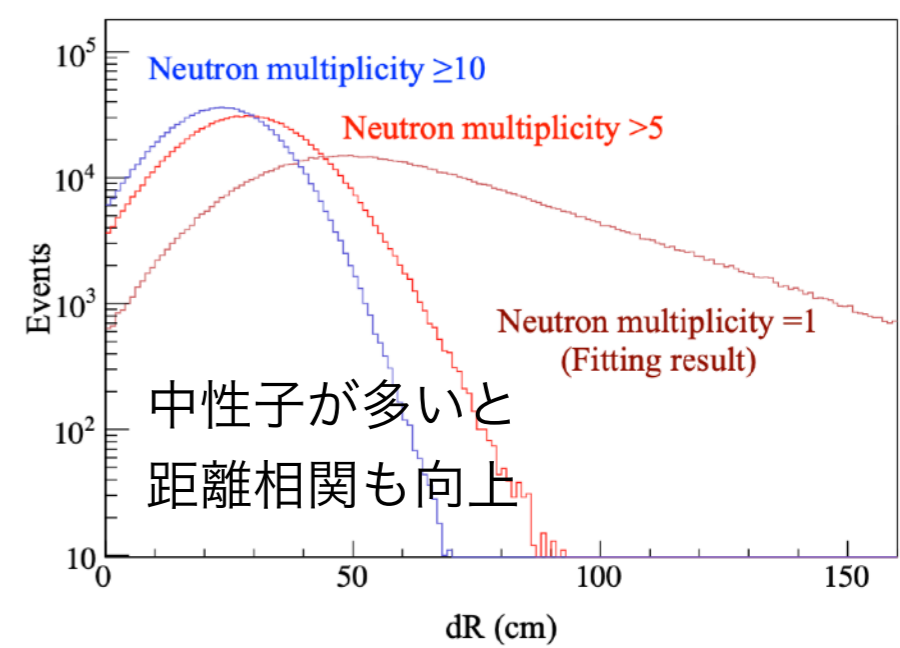
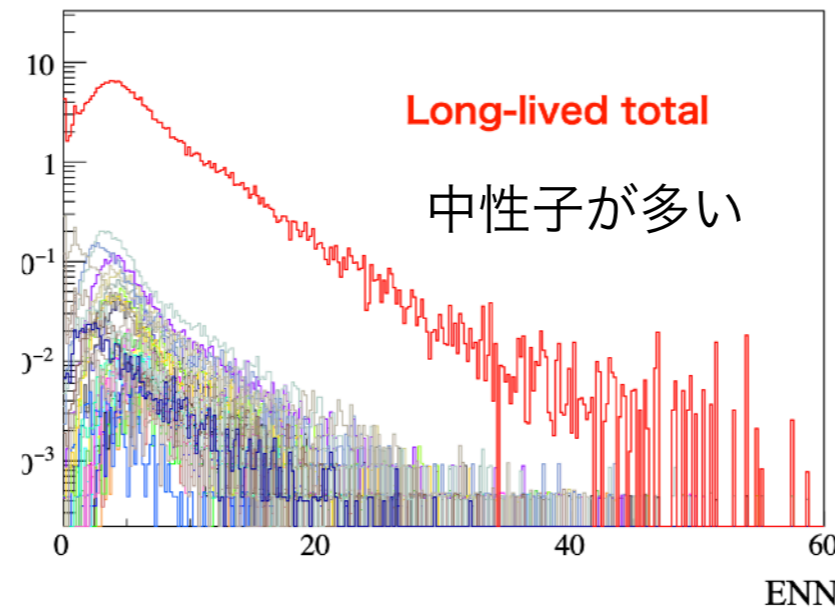
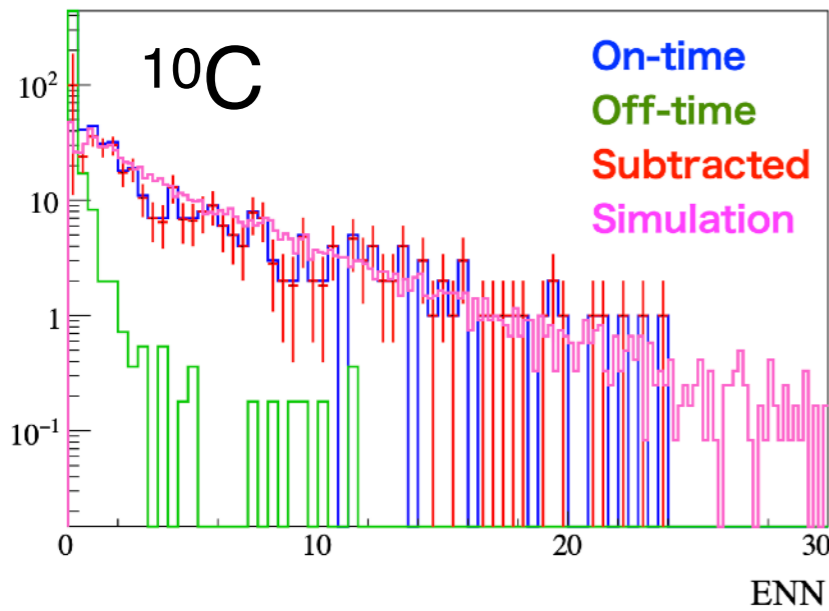


主要長寿命原子核

	nuclei	rate_all	rate_ROI	T _{1/2} (s)					
β ⁺	82Rb	0.069	0.011	7.638e+01	β ⁺	118Sb	1.426	0.185	2.160e+02
β ⁺	88Y	0.141	0.107	9.215e+06	β ^{-+γ}	124Sb	0.045	0.014	5.201e+06
β ⁺	90Nb	0.086	0.010	5.256e+04	β ⁺	115Te	0.124	0.014	3.480e+02
β ⁺	96Tc	0.063	0.013	3.698e+05	β ⁺	117Te	0.574	0.057	3.720e+03
β ⁺	98Rh	0.080	0.011	5.232e+02	β ⁺	119I	0.504	0.048	1.146e+03
β ⁺	100Rh	0.223	0.075	7.488e+04	β ⁺	120I	0.930	0.085	4.896e+03
β ⁺	104Ag	0.234	0.020	4.152e+03	β ⁺	122I	2.374	0.343	2.178e+02
β ⁺	107In	0.128	0.015	1.944e+03	β ⁺	124I	1.622	0.178	3.608e+05
β ⁺	108In	0.236	0.101	3.480e+03	β ^{-+γ}	130I	1.590	0.256	4.450e+04
β ⁺	110In	0.549	0.133	1.764e+04	β ^{-+γ}	132I	0.427	0.146	8.262e+03
β ⁺	109Sn	0.114	0.024	1.080e+03	β ^{-+γ}	134I	0.178	0.037	3.150e+03
β ⁺	113Sb	0.244	0.036	4.002e+02	β ^{-+γ}	135I	0.309	0.017	2.365e+04
β ⁺	114Sb	0.360	0.027	2.094e+02	β ⁺	121Xe	0.518	0.072	2.406e+03
β ⁺	115Sb	0.774	0.030	1.926e+03	β ⁺	126Cs	0.142	0.019	9.840e+01
β ⁺	116Sb	1.008	0.078	9.480e+02	β ⁺	128Cs	0.319	0.043	2.172e+02
					β ⁺	130Cs	0.289	0.011	1.753e+03
						Total	479.063	2.385	

寄与の小さい多核種が存在するが、β⁺やβ^{-+γ}には“neural net PID”が有効

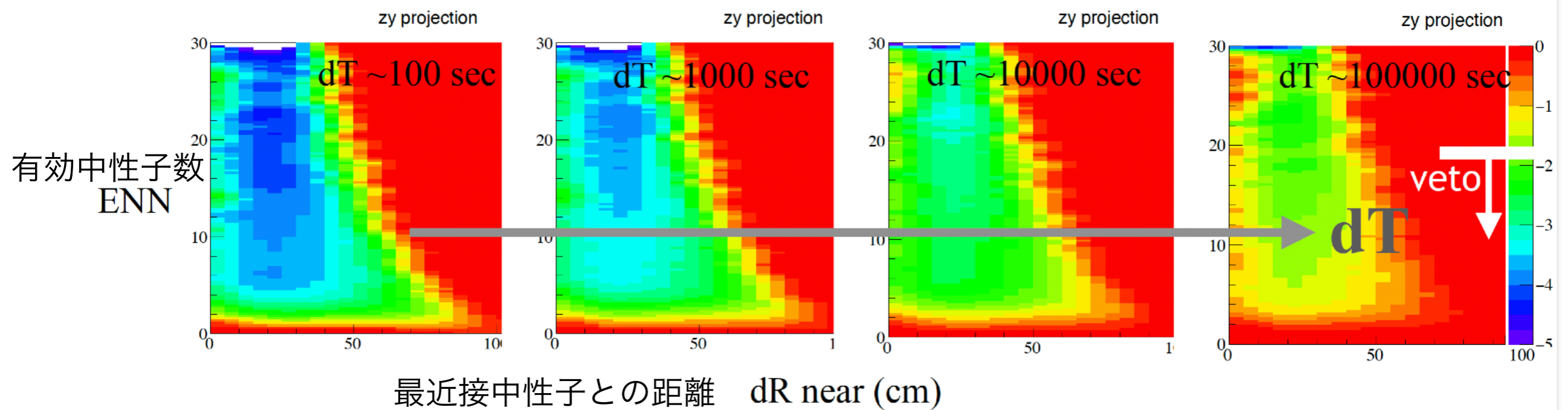
中性子生成数を使って長時間 veto を実現 (尾崎博士論文2020)



有効中性子数

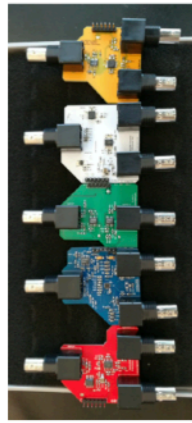
有効中性子数

$\log_{10}(1-LHratio)$ distribution (3D)



Likelihood を駆使し 100,000秒の時間差まで含む veto を実現

ミューオン直後の中性子検出が重要 → 新型電子回路



→
2ch



→

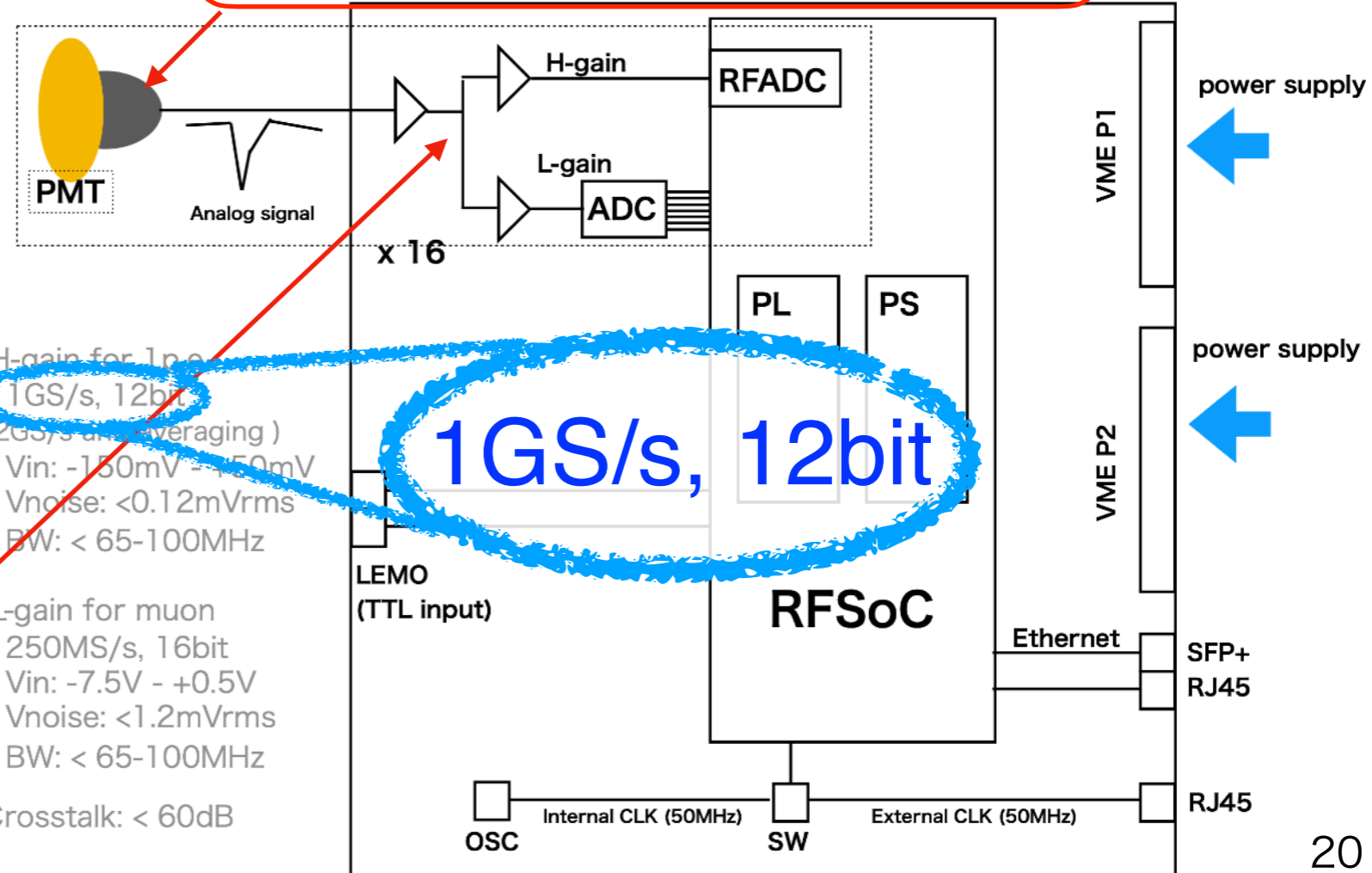


single ended → differential
アナログボード (MIT)

RFSoc 評価ボード (ZCU111)
ファームウェアを開発中 (中村公)

16ch プロトタイプ機
3台が9月末納入予定
(石徹白&company + MIT)
来年から追加購入 + 順次適用

bleeder circuit tuning against overshoot

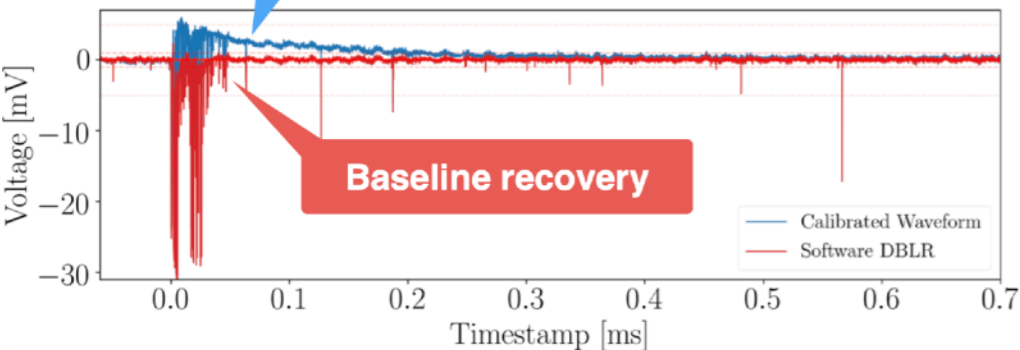


1GS/s, 12bit

Digital Baseline Recovery

Overshoot from PMT
AC coupling

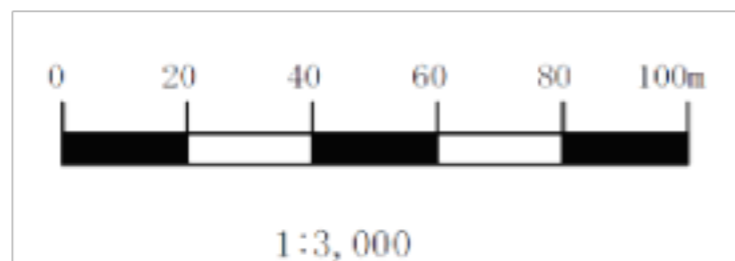
Baseline recovery



H-gain for $1\mu\text{e}$
 - 1GS/s, 12bit
 (2GS/s and averaging)
 - V_{in} : -150mV ~ +150mV
 - V_{noise} : < 0.12mVrms
 - BW: < 65-100MHz
 L-gain for muon
 - 250MS/s, 16bit
 - V_{in} : -7.5V ~ +0.5V
 - V_{noise} : < 1.2mVrms
 - BW: < 65-100MHz
 Crosstalk: < 60dB

クリーン環境の整備状況

led by 古賀



- 第1期
- ①. 液体シンチレータ実験室 L16m×W10m×H10m
 - ①'. 計測室 L12m×W4.5m×H4m
 - ②. スーパークリーンルーム L32m×W7m×H6.5m
 - ②'. 前室 L4.5m×W6m×4m
 - ③. 超低ラドン濃度空気機器室
 - ④. アクセス通路 L13m (×4.5m×4m)
- 第2期
- ⑤. KamLAND-2 実験室 円筒部 (φ24m×H24m), ドーム部H6.5m
 - ⑥. コントロールルーム L15m (×4.5m×4m)
 - ⑦. エレキハット L15m (×4.5m×4m)
 - ⑧. 斜坑 L170m (×4.5m×4m)
 - ⑨. 進入部拡幅 L20m (×4.5m×4m), 斜度12度

現在このトンネルの片付け中

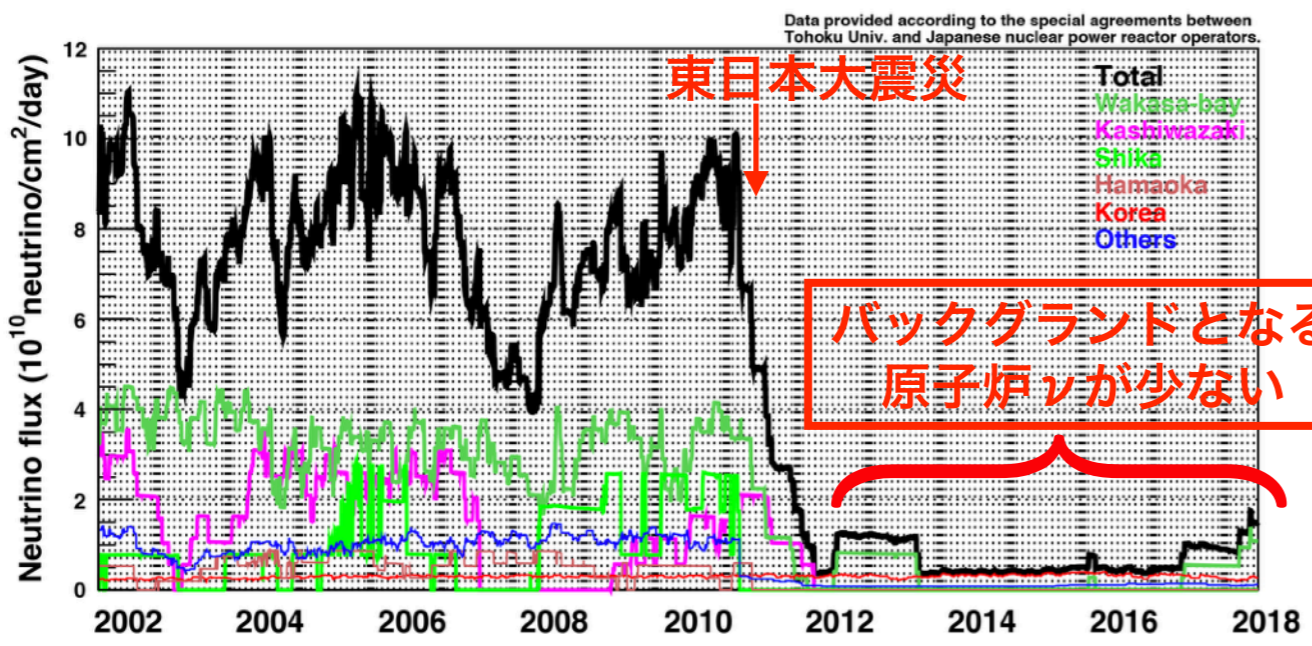
バッファータンクの移設先は
受入のための工事完了

今後の拡幅に関するブレイン
ストーミングの状況

油が高価だから新しい空洞掘った方が良いか？
大きめにしたらバックグラウンドも減るしね。
油安くなりそうだし現行タンクを使った方が良くない？
新しい油なら性能向上できるぞ。
純空気はいずれにせよ必要だから準備始めとこか。

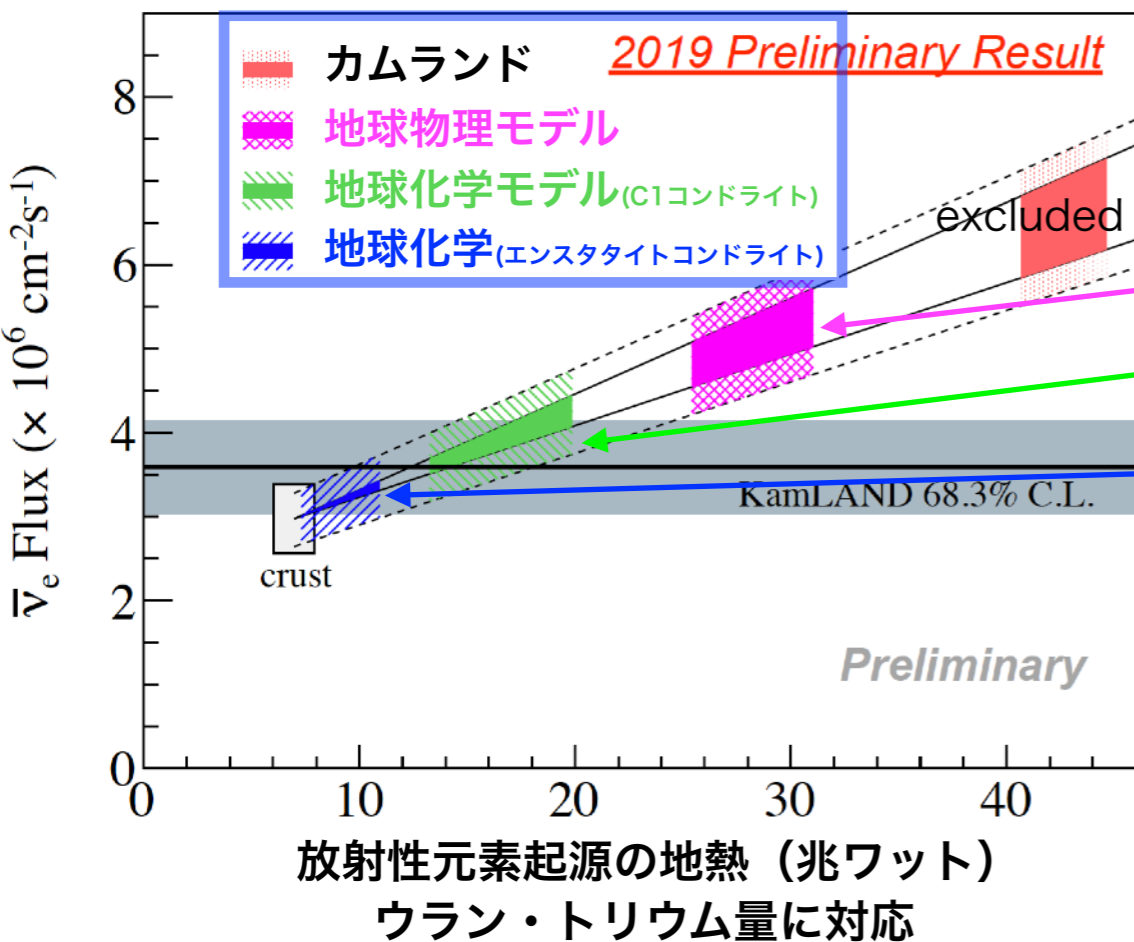
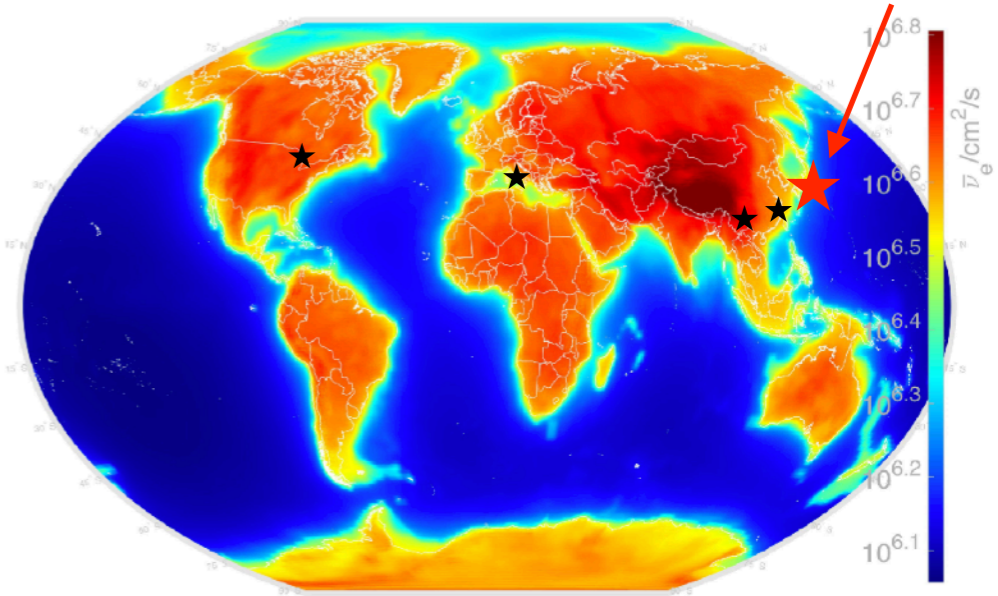
地球ニュートリノ観測の現状

BG源となる原子炉の運転状況



今後も 地球ニュートリノ観測網で最重要

唯一大陸プレートの端



マントル対流の謎

地球物理モデルは
一層対流
他の地球化学モデルは
多層対流

地球始源隕石の謎

元素比の一致する
C1コンドライト
(地球化学モデル)
ウラン・トリウム量
同位体比の一致する
エンスタタイト
コンドライト
(地球化学モデル)

長く論争の続く
地球の始源隕石やマントル対流
を地球ν観測で解明できる!!!

まとめ

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索は、マヨラナ性の検証を通して、「宇宙・素粒子の大問題」解明への糸口となる。

逆階層のバンド領域へ切り込む40meVや将来計画の20meVの感度は大きなパラメータ被覆率があり複数の理論モデルにも有感で、着実な感度向上が重要である。

神岡地下は最先端地下施設の中では比較的浅く、宇宙線による原子核破砕が問題になる。

長寿命の ^{136}Xe 破砕によるバックグラウンドは day order の veto が必要であり、**ミューオン直後の中性子検出効率が除去性能向上の鍵**である。

本計画研究では解析の改良に加えて、**中性子検出効率を改善する将来計画の主電子回路を開発・先行導入し逆階層のバンド領域へ切り込む感度(40meV)の実現を目指す。**

同時に将来計画に向けた環境整備や地球ニュートリノ観測も着実に進めている。

Stay tuned!