



東北大学



カムランド2

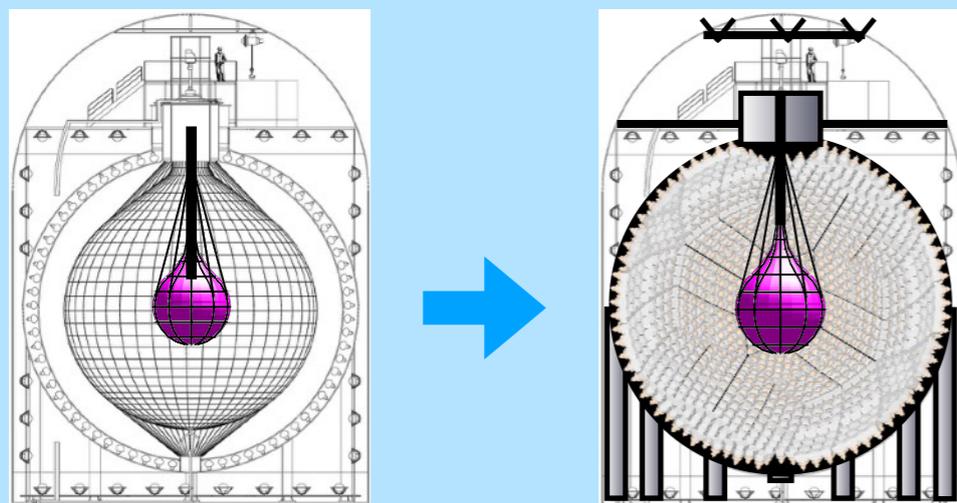
-極低放射能環境でのニュートリノ研究-

東北大学ニュートリノ科学研究センター
井上邦雄

極低放射能環境でのニュートリノ研究

- ニュートリノ観測装置カムランドを高性能化し、極低放射能を極めて、
1. 「宇宙物質優勢の謎」「軽いニュートリノ質量の謎」に挑む。
 2. 「地球の始源隕石」「地球内部のダイナミクス」解明に挑む。
 3. 低エネルギーニュートリノ天文学(マルチメッセンジャー天文学)
 4. 神岡茂住坑での大型アクティビティ継続

カムランドからカムランド2へ



実施内容

極低放射能の追求	地下スーパークリーンルーム (共同利用に) 高純度空気 液体シンチレータ純化装置、純水装置
汎用化	導入口拡大 (50cmφ → 2mφ)
高性能化	5倍光収集、蛍光バルーン、高性能電子回路

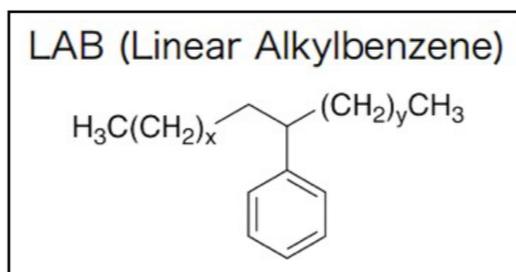
開発は実施済み



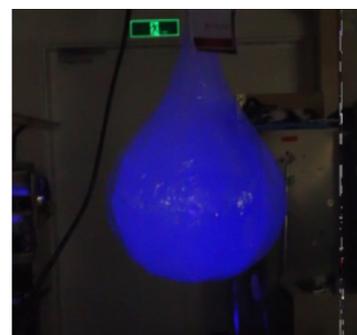
試作集光ミラー



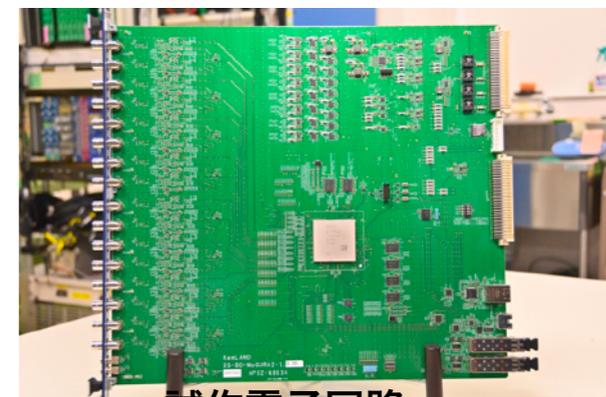
高量子効率PMT



新型シンチレータ



試作蛍光バルーン



試作電子回路

用途：重要課題1

ニュートリノレス二重ベータ崩壊の探索

宇宙素粒子の大問題解明へ

「なぜ無から生じた宇宙に物質があり反物質がない？」

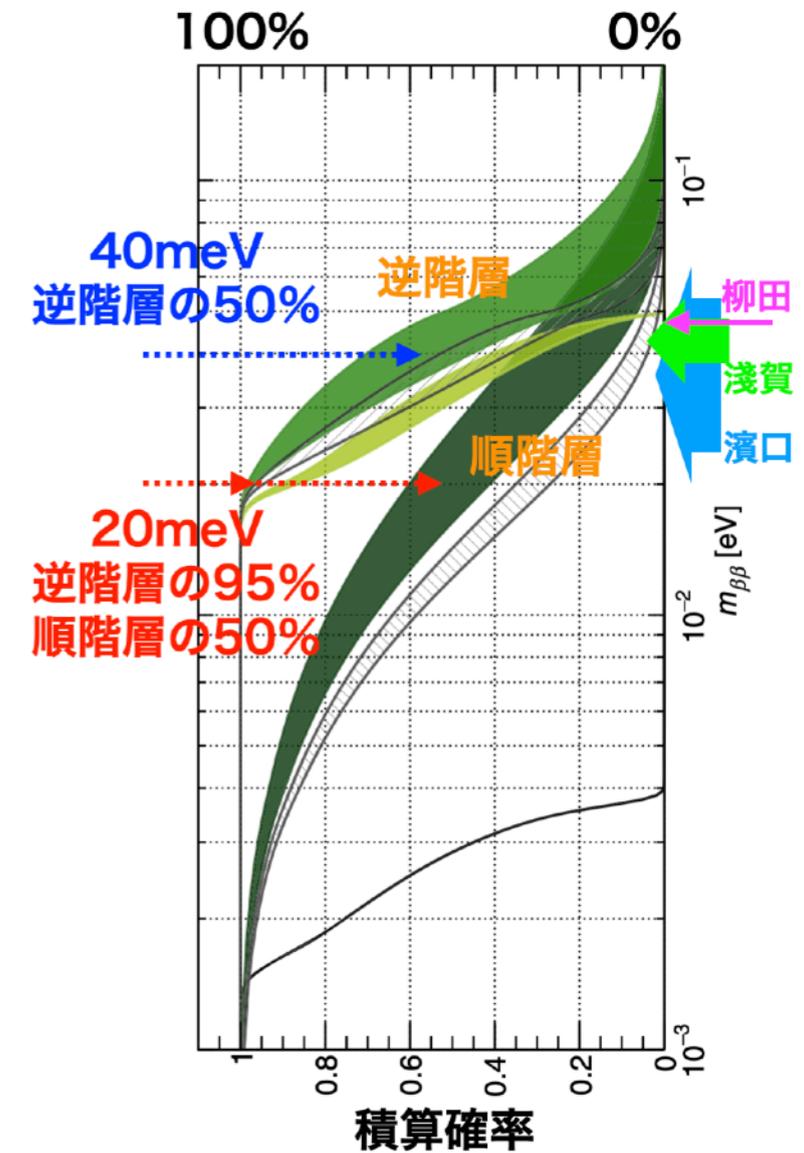
「なぜニュートリノは極端に軽い？」

大発見確率

{	逆階層構造	95%
	順階層構造	50%

国内・欧米の宇宙素粒子・原子核研究の最重要課題
カムランド禅が $0\nu 2\beta$ 探索で世界を大きくリード!
2019年1月スタートの観測は既に逆階層構造に突入
競合の10分の1の低コストで世界をさらにリード

No.1実績



用途：重要課題2

地球ニュートリノ観測の高精度化

地球科学の大問題解明へ

「マントルはどのように対流しているのか？」

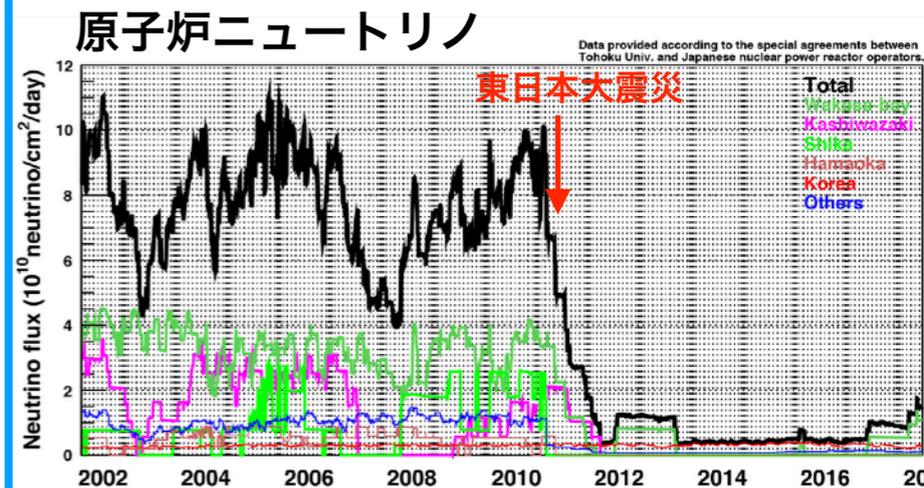
「地球を形成した隕石はどれなのか？」

観測の邪魔になる原子炉ニュートリノが少ない今がチャンス
今後も大陸プレートの端で地球ニュートリノ観測網の中核

原子炉ニュートリノ振動の精密研究を通して実現!
カムランドはニュートリノ地球科学のパイオニアで中核!

No.1実績

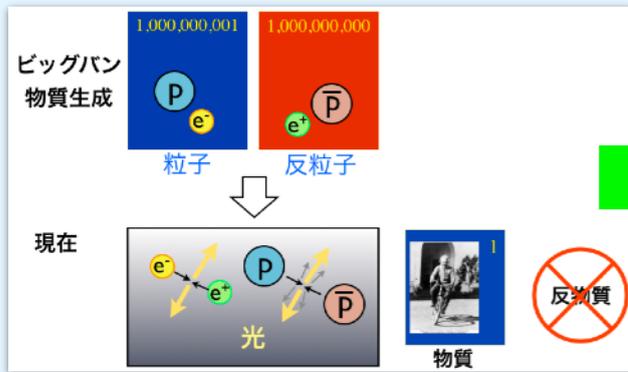
No.1実績



宇宙の歴史と物質の進化に幅広く貢献

$\frac{138\text{億年}}{10^{-37}\text{秒}} = 54\text{桁の時間スケール}$ 、 $\frac{10^{10}\text{GeV}}{2.7\text{K}} = 22\text{桁の温度スケール}$ 、
 $\frac{3\text{Gpc}}{(10^{10}\text{GeV})^{-1}} = 51\text{桁の距離スケール}$ 、を紡いで解き明かす。

誕生

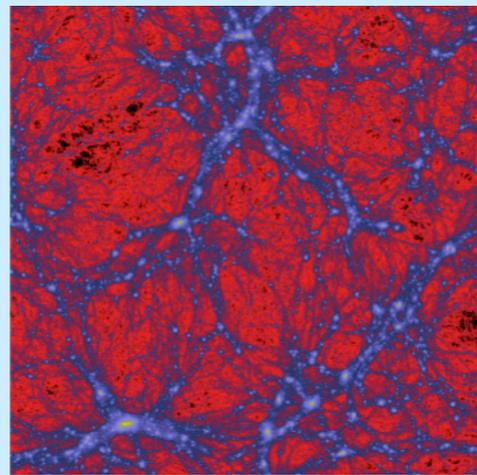


物質生成
ビッグバン元素合成

宇宙物質優勢の謎
物質はどこから来たのか？

宇宙・素粒子の大問題

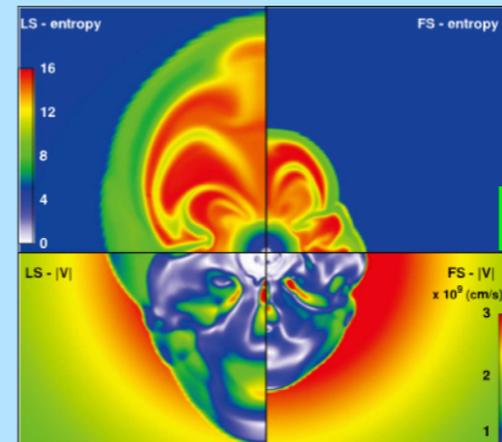
成長



構造形成
銀河形成

暗黒物質の謎
星・銀河はどのように作られたのか？

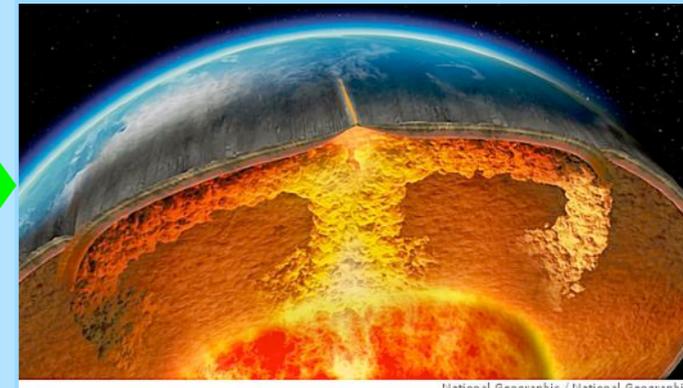
爆発



星形成
中重元素・重元素生成
元素の放出・集積

化学進化の謎
元素はどのように作られたのか？

現在



太陽系形成
地球形成
地球ダイナミクス

地球始源隕石の謎
マントル対流の謎
どう地球に行き着いたのか？

地球科学の大問題

トップランナー

特定のモデルに感度

特徴的な貢献

トップランナー

推進体制

カムランド国際共同研究(約50人)

日本

東北大学ニュートリノ科学研究センター (ホスト)

東北大学学際科学フロンティア研究所

東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構

大阪大学

徳島大学

京都大学

米国

カリフォルニア大学バークレー校

テネシー大学

デューク大学

ノースカロライナ大学

トライアングル大学原子核研究所

ワシントン大学

マサチューセッツ工科大学

バージニア工科大学

ハワイ大学

ボストン大学

オランダ

アムステルダム大学



カムランドの特徴・優位性

スーパーカミオカンデ (東大)

1996年実験開始 (現在SK-VI)

5万トン 超純水

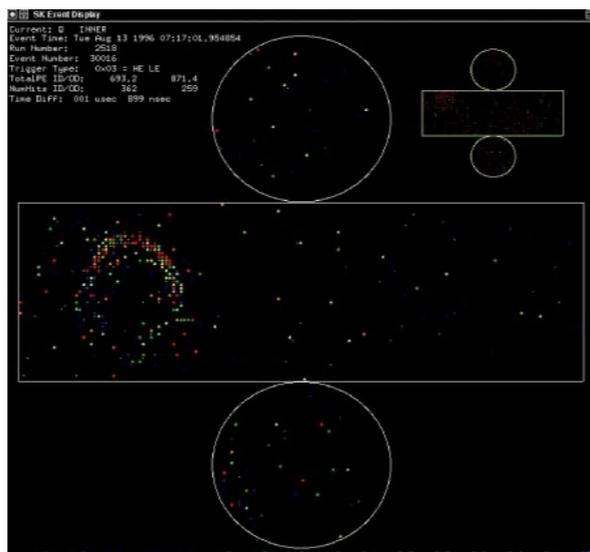
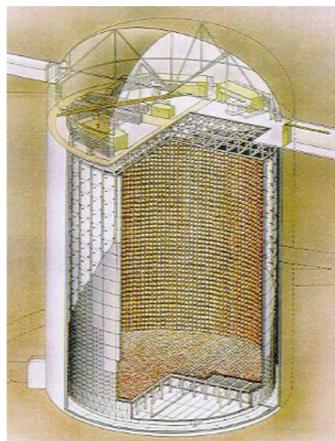
チェレンコフ光を観測

6光電子/100万電子ボルト

最低エネルギー ~4 MeV

観測対象

- 太陽ニュートリノ
- 大気ニュートリノ
- 加速器ニュートリノ
- 超新星ニュートリノ
- 陽子崩壊
- など



カムランド (東北大)

2002年実験開始 (これまでOD改修のみ)

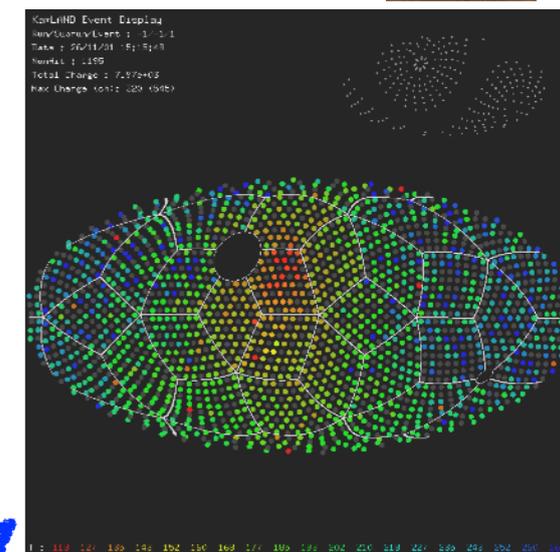
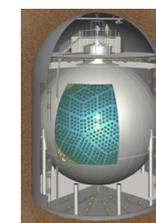
1000トン 超純油

シンチレーション光を観測

500光電子/100万電子ボルト

最低エネルギー ~0.25 MeV

観測対象



- 原子炉反ニュートリノ
- 地球反ニュートリノ
- 低エネルギー太陽ニュートリノ
- ニュートリノレス二重ベータ崩壊
- 超新星前兆ニュートリノ
- 核子崩壊
- など

水ではできない!

世界トップの実績

同じ現象が明るく観測できる

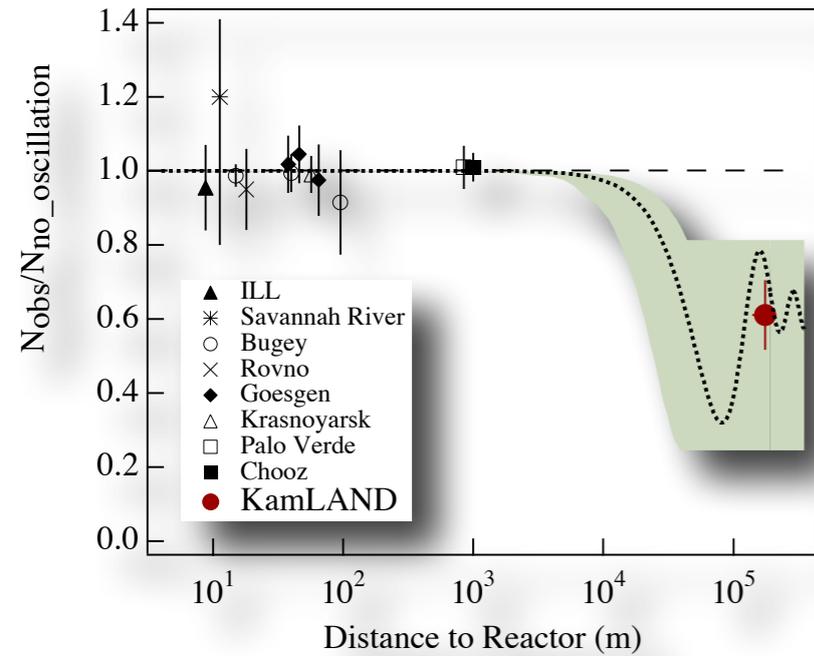
放射性イオンが
溶けにくい

油を使うことで、水検出器と比べて明るく ($\times 100$)、低放射能 ($1/100$) !

低エネルギー現象の研究、極低放射能を必要とする稀な現象の探索で世界をリード!

研究の実績 カムランド（禅）実験の業績ハイライト

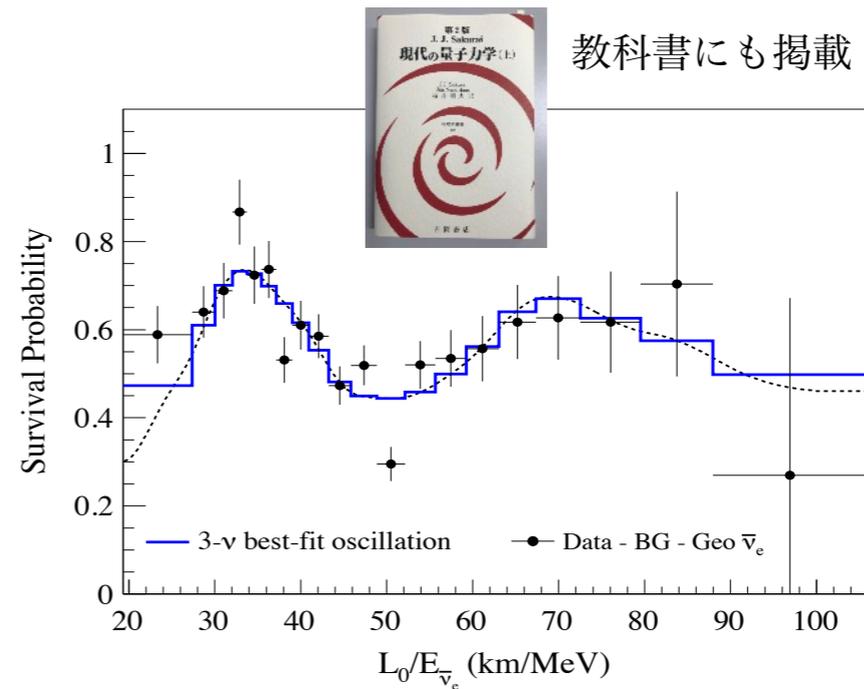
原子炉ニュートリノ欠損の証拠



- 2003年仁科記念賞 (鈴木)
- 2004年小柴賞 (井上、白井、末包)
- 2005年紫綬褒章 (鈴木)
- 2006年学士院賞 (鈴木)
- 2007年ポンテコルボ賞 (鈴木)
- 2016年ブレークスルー賞

引用数3000+

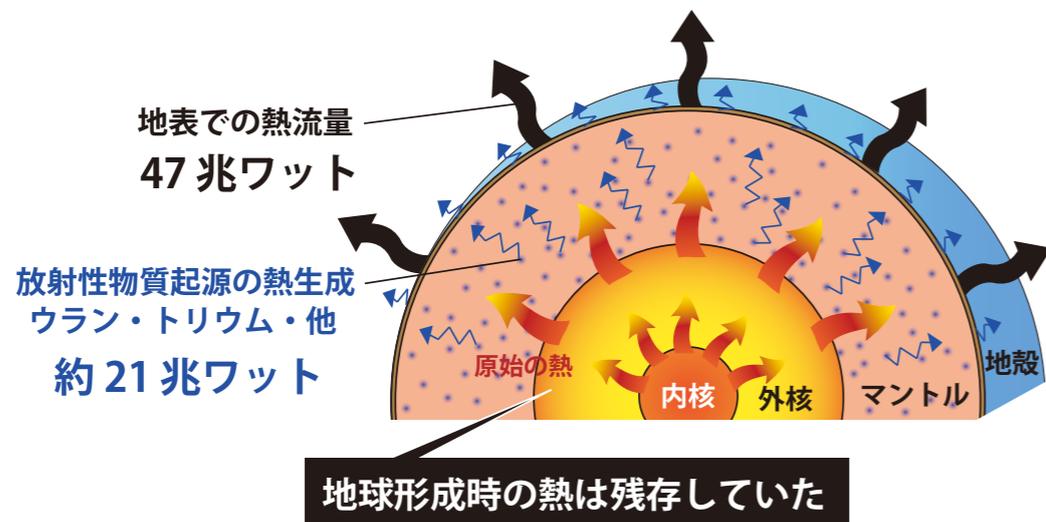
原子炉ニュートリノ振動の精密測定



- 2008年日本学術振興会賞 (井上)
- 2012年黒田チカ賞 (渡辺)

最も高精度な
ニュートリノ質量
情報 (2.4%)

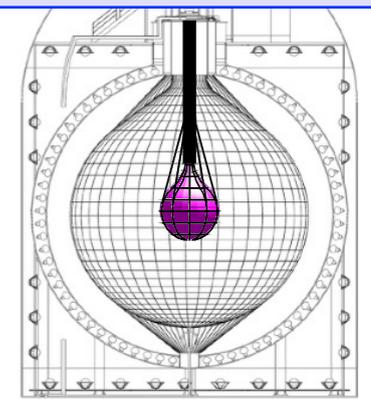
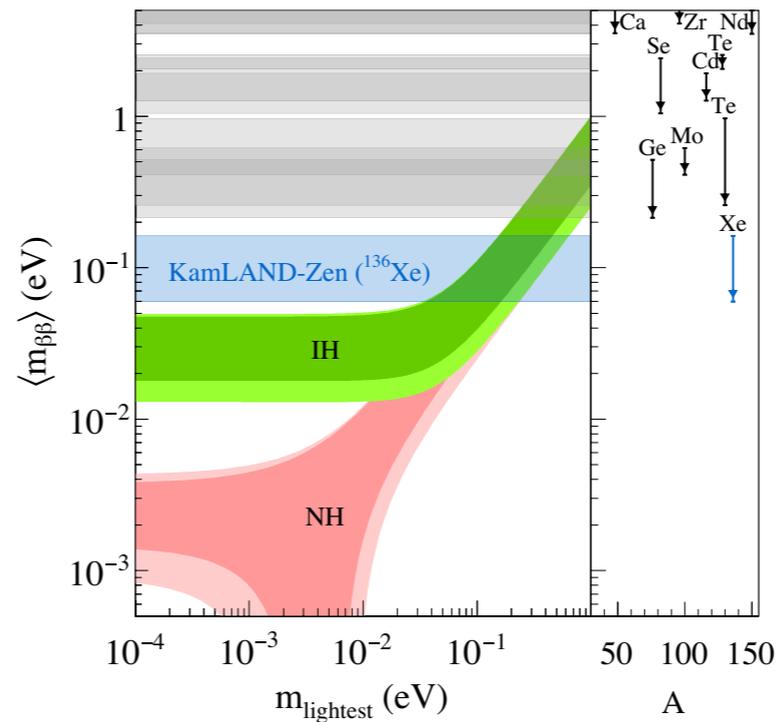
地球ニュートリノの観測



- 2012年仁科記念賞 (井上)
- 2013年戸塚洋二賞 (鈴木、井上)
- 2020年米沢富美子記念賞 (渡辺)

ニュートリノ地球物理学を創出

世界最高感度のニュートリノレス二重ベータ崩壊探索



- 2013年高エネルギー物理学奨励賞、日本物理学会若手奨励賞、黒田チカ賞 (丸藤)
- 2014年井上研究奨励賞 (丸藤)

世界最高感度達成
縮退構造を排除



市村晃一
カムランドでの
ニュートリノ振動
パラメータの精密
測定



榎本三四郎
ニュートリノ地
球物理とカムラ
ンドでの地球
ニュートリノの
観測



竹本康浩
CNOサイクル太
陽ニュートリノ観
測のためのデッ
トタイムフリー電
子回路の開発



渡辺寛子
カムランドにお
ける反ニュート
リノ信号の包括
的研究



丸藤亜寿紗
カムランドで
のニュートリノを
伴わない二重
ベータ崩壊探索
の最初の結果



吉田学立
KamLAND-Zen
でのニュートリノ
を伴わない二重
ベータ崩壊測定
によるニュートリ
ノのマヨラナ質
量への制限
二重ベータ崩壊



松田さゆり
徹底したバックグ
ラウンド低減後の
KamLAND-Zen
における¹³⁶Xeで
のニュートリノを
伴わない二重ベ
ータ崩壊の探索



尾崎秀義
倍量¹³⁶Xeを
使ったニュート
リノレス二重
ベータ崩壊の高
感度探索

ニュートリノ振動
地球ニュートリノ
太陽ニュートリノ

カムランドは、これまで国内外に
博士42名、修士約100名を輩出
今後も教育・若手育成の継続を見込む。



小川桃世
KamLANDにお
ける太陽ニュー
トリノ観測向け
た液体シンチ
レータの純化



大浦智也
KamLAND2-
Zen実験に向け
た新液体シンチ
レータの純化



寺岡夕里
金属スカベン
ジャーによる
KamLAND-Zen
の低放射能化に
関する研究



大野淳
軽い暗黒物質探
索に向けた超伝
導検出器の研究
開発



安部清尚
T2Kビームを用
いたKamLAND
でのニュートリ
ノ反応研究

1. 「宇宙物質優勢の謎」 「軽いニュートリノ質量の謎」 に挑む。

ディラック vs. マヨラナ

スピン1/2の粒子の相対論的運動方程式（ディラック方程式）は、4つ以上の自由度が必要。

e	左巻き電子 (e^-_L)	右巻き電子 (e^-_R)
	左巻き陽電子 (e^+_L)	右巻き陽電子 (e^+_R)

ν	左巻き ν_L	右巻き $\nu_R (N_R)$ 未発見
	左巻き $\bar{\nu}_L (\bar{N}_L)$ 未発見	右巻き $\bar{\nu}_R$

ディラックニュートリノ



$\nu_L \quad \underbrace{\nu_R \quad \bar{\nu}_L}_{\text{観測できないだけ}} \quad \bar{\nu}_R$

観測できないだけ

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

マヨラナニュートリノ



$\nu_L \quad \bar{\nu}_R \quad \underbrace{\bar{N}_L \quad N_R}_{\text{とても重く未発見}}$

とても重く未発見

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

マヨラナニュートリノはレプトン数を破る

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

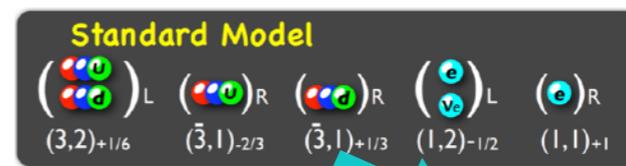
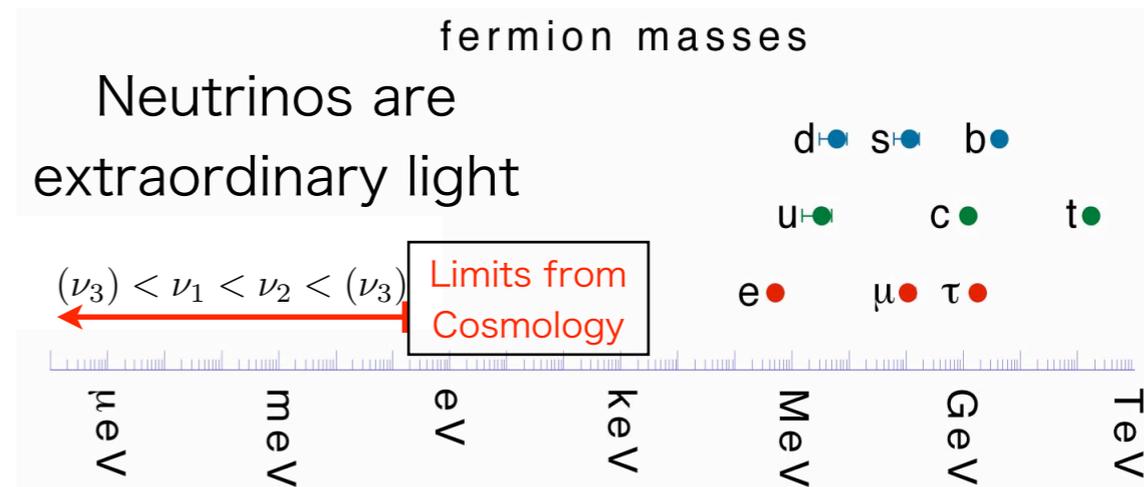
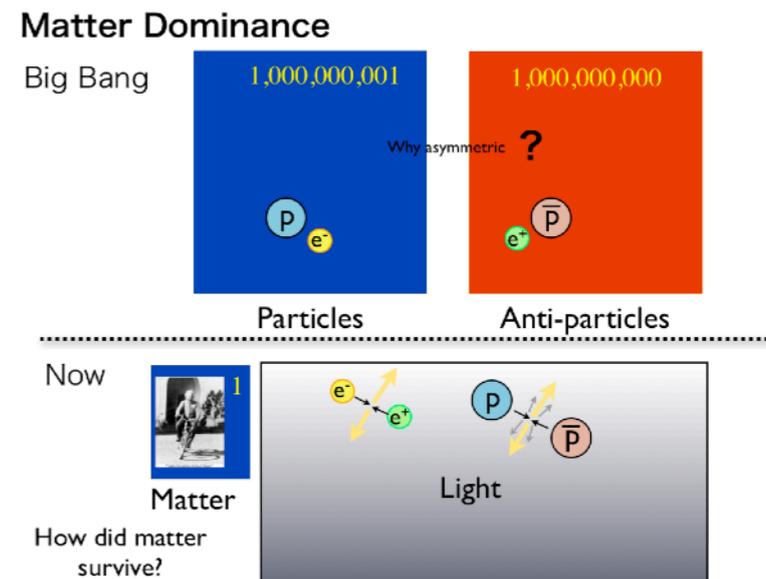
「暗黒物質の起源は？」

N_R があれば・・・

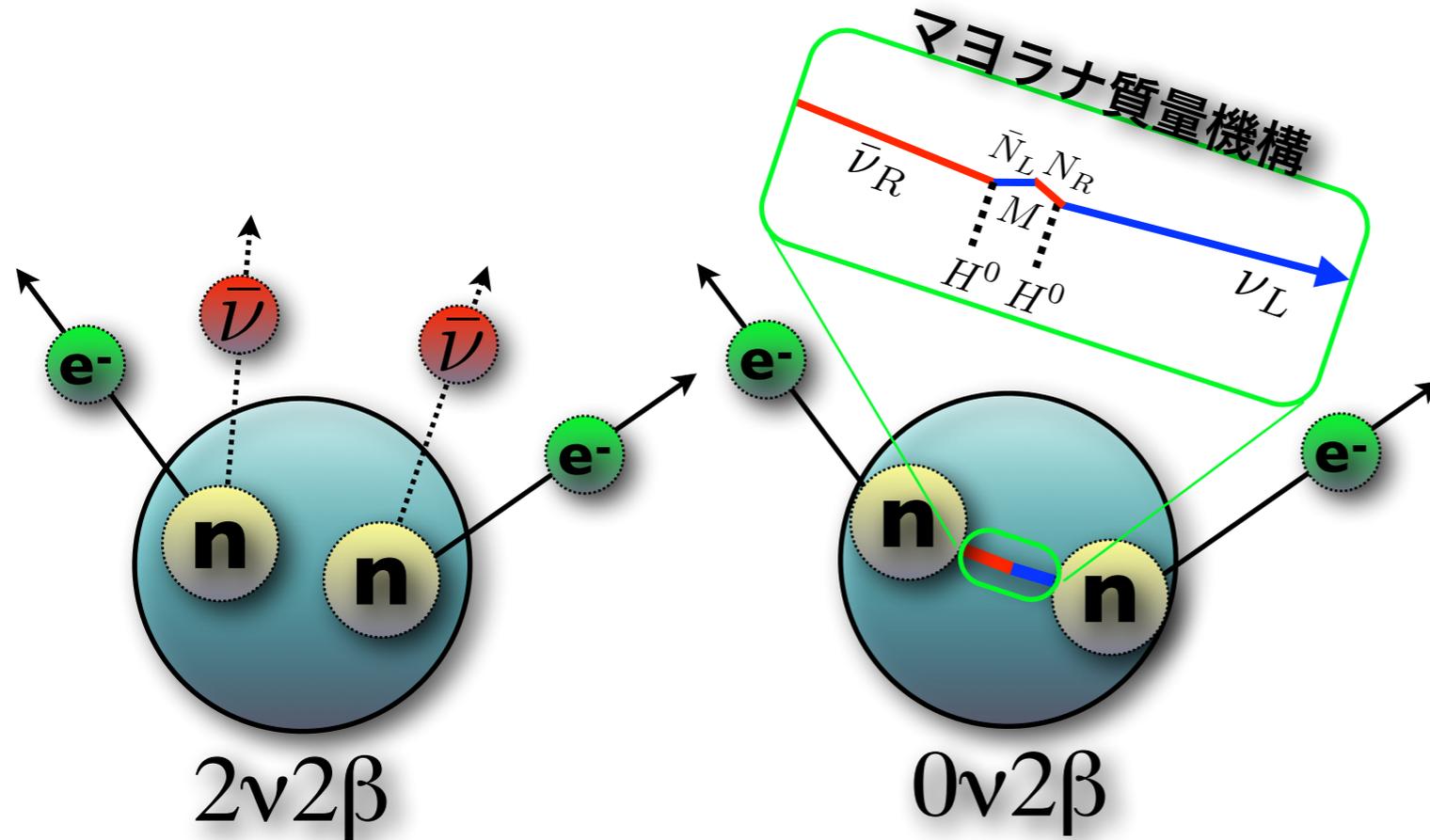
「 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \Rightarrow SU(5) \Rightarrow SO(10)$?」

N_R があれば・・・

N_R は作れないとしても、傍証はないのか？



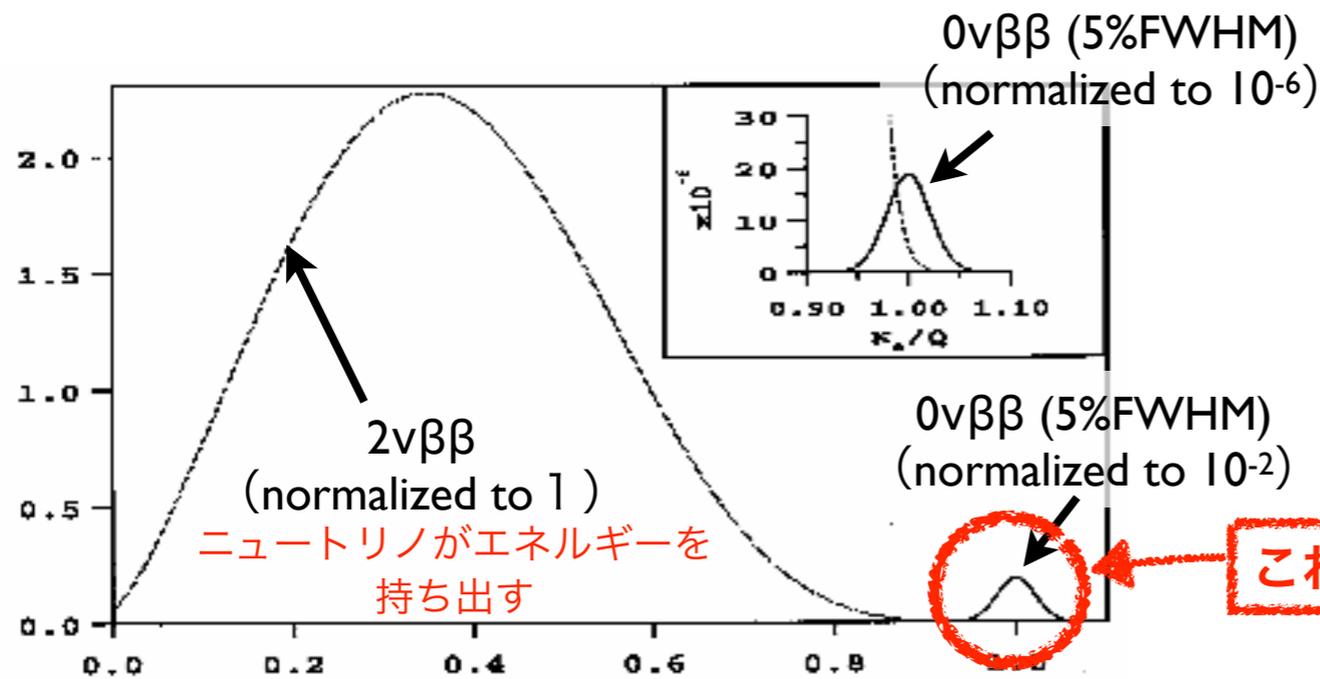
マヨラナニュートリノ (N_R 導入の前提) なら
 ニュートリノが出ない二重 β 崩壊 ($0\nu 2\beta$) が起こる。



理論の歴史

- 1930 軽い中性粒子 (W.Pauli)
- 1933 β 崩壊の理論 (E.Fermi)
- 1935 $2\nu 2\beta$ (M.Goeppert-Mayer)
- 1937 マヨラナニュートリノ (E.Majorana)
- 1939 $0\nu 2\beta$ (W.H.Furry)

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



ニュートリノがエネルギーを
持ち出す

全エネルギーが観測される。

**$0\nu 2\beta$ は、マヨラナ有効質量が
大きいほど発見しやすい。**

マヨラナCP

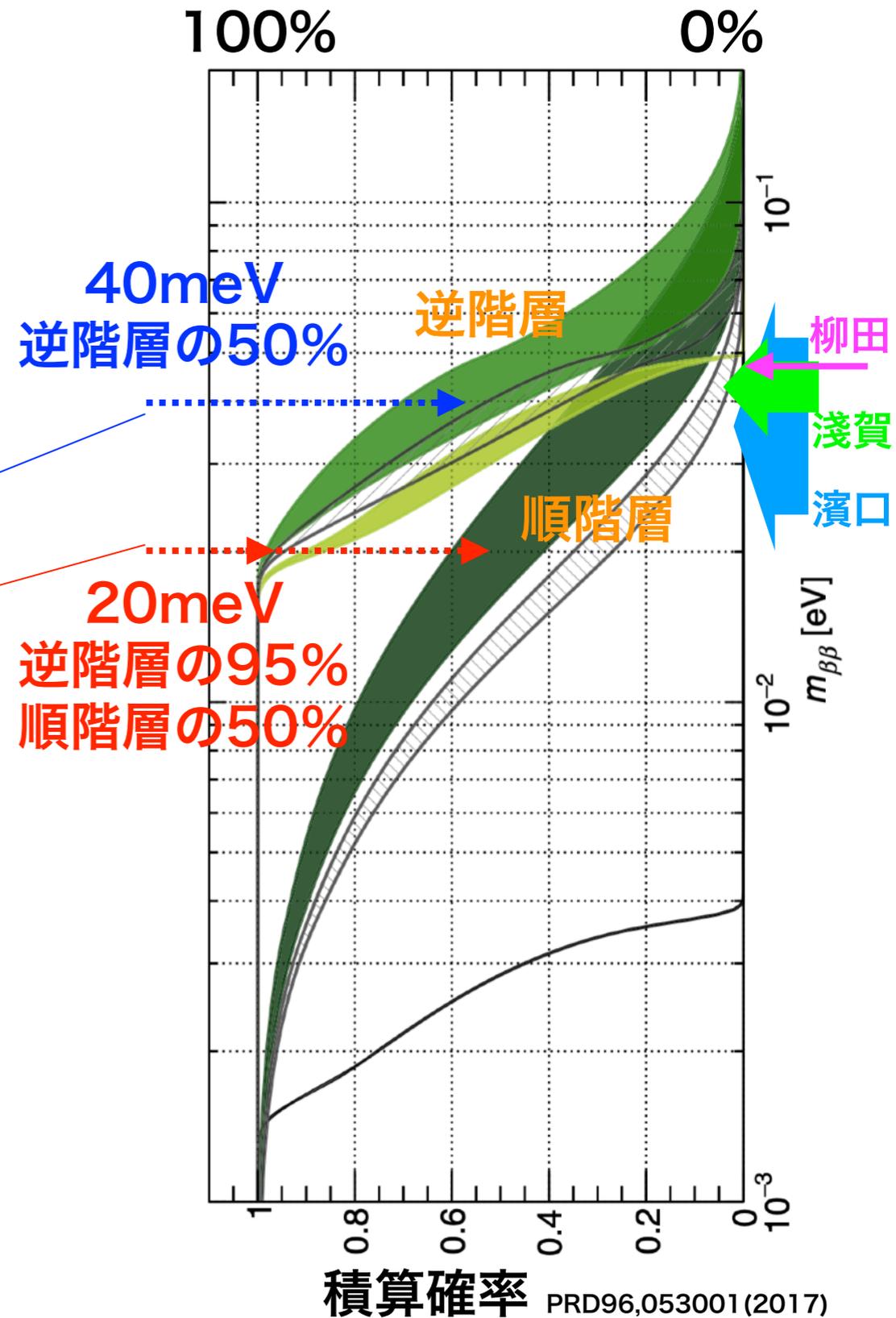
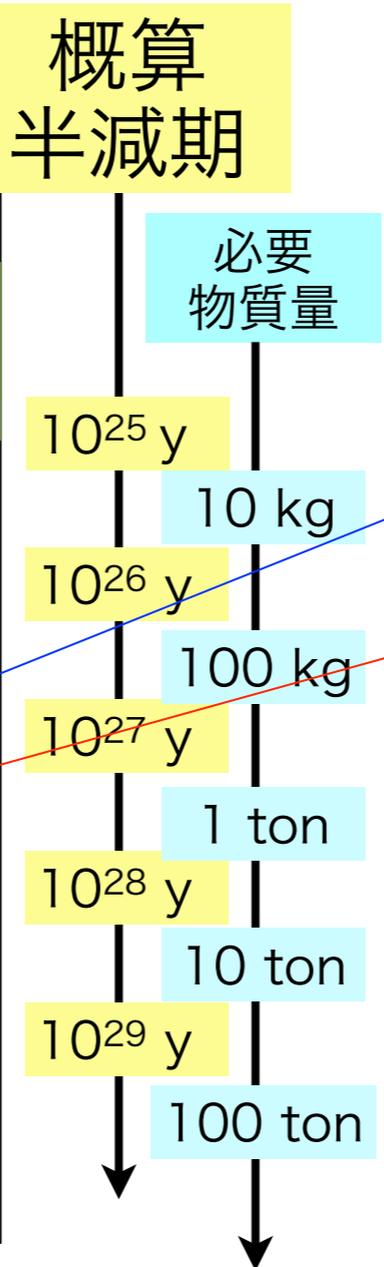
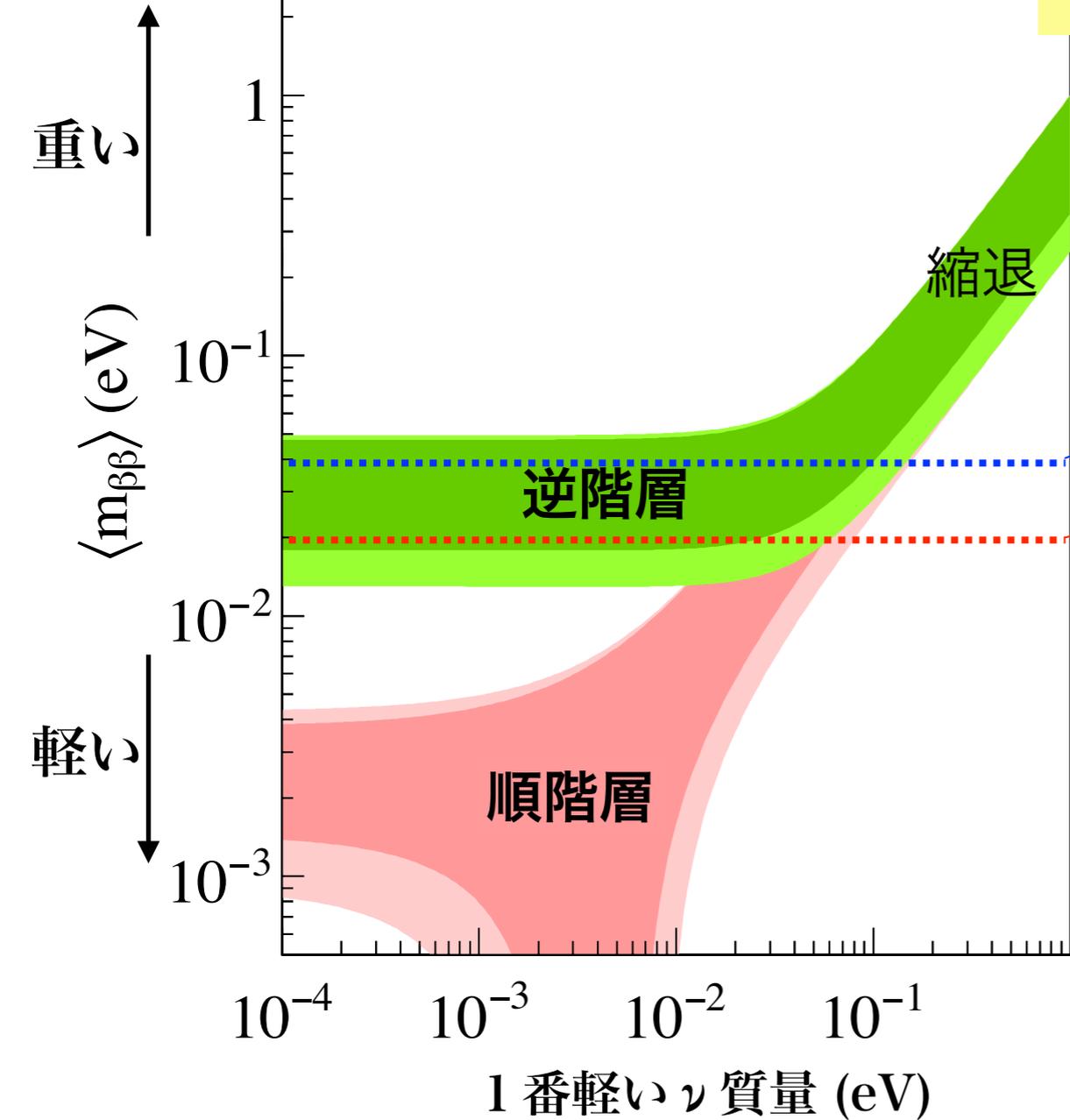
$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum m_i |U_{ei}|^2 \varepsilon_i \right|$$

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

実験の規模はどのくらいか？

柳田：PRD86,013002(2012)
 濱口：Eur.Phys.J.C77 (2017) 763
 浅賀：Phys.Lett. B811(2020)135956

0ν2βで測る
 ニュートリノ
 の重さ



●
 ニュートリノ振動研究
 で許される領域

●
 ニュートリノ振動研究
 で許される領域

縮退: 3種のニュートリノが重い

逆階層: 2種のニュートリノが重い

順階層: 1種のニュートリノが重い

積算確率 PRD96,053001(2017)

KamLANDは巨大で極低放射能→0ν2β探索に最適

^{136}Xe 希ガス

遠心分離による同位体濃縮が可能

液体シンチレータに約3重量%溶ける

キセノンを溶かした液体シンチレータを風船に入れてカムランドに沈めたら、、、

無改造で開発も最小限、迅速&低コスト！！

○課題はXeの購入 (2010年頃)

空気の成分

N ₂	78%
O ₂	21%
Ar	9340ppm
CO ₂	330ppm
Ne	18.18ppm
He	5.24ppm
CH ₄	2.00ppm
Kr	1.14ppm
H ₂	0.50ppm
Xe	0.09ppm

鉄鋼用酸素に
合わせて製造
キセノン年間
生産量
~51000kg

8200kg調達
約20億円!!

自然存在比

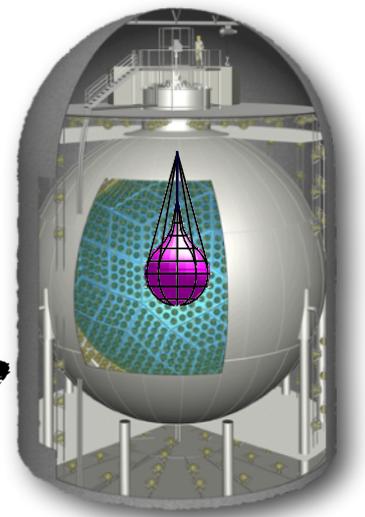
124	0.1%
126	0.09%
128	1.91%
129	26.4%
130	4.1%
131	21.2%
132	26.9%
134	10.4%
136	8.9%

遠心分離で
濃縮(高額)

91%濃縮
 ^{136}Xe 800kg

購入額

約14億円??



残留物売却
7400kg

市場

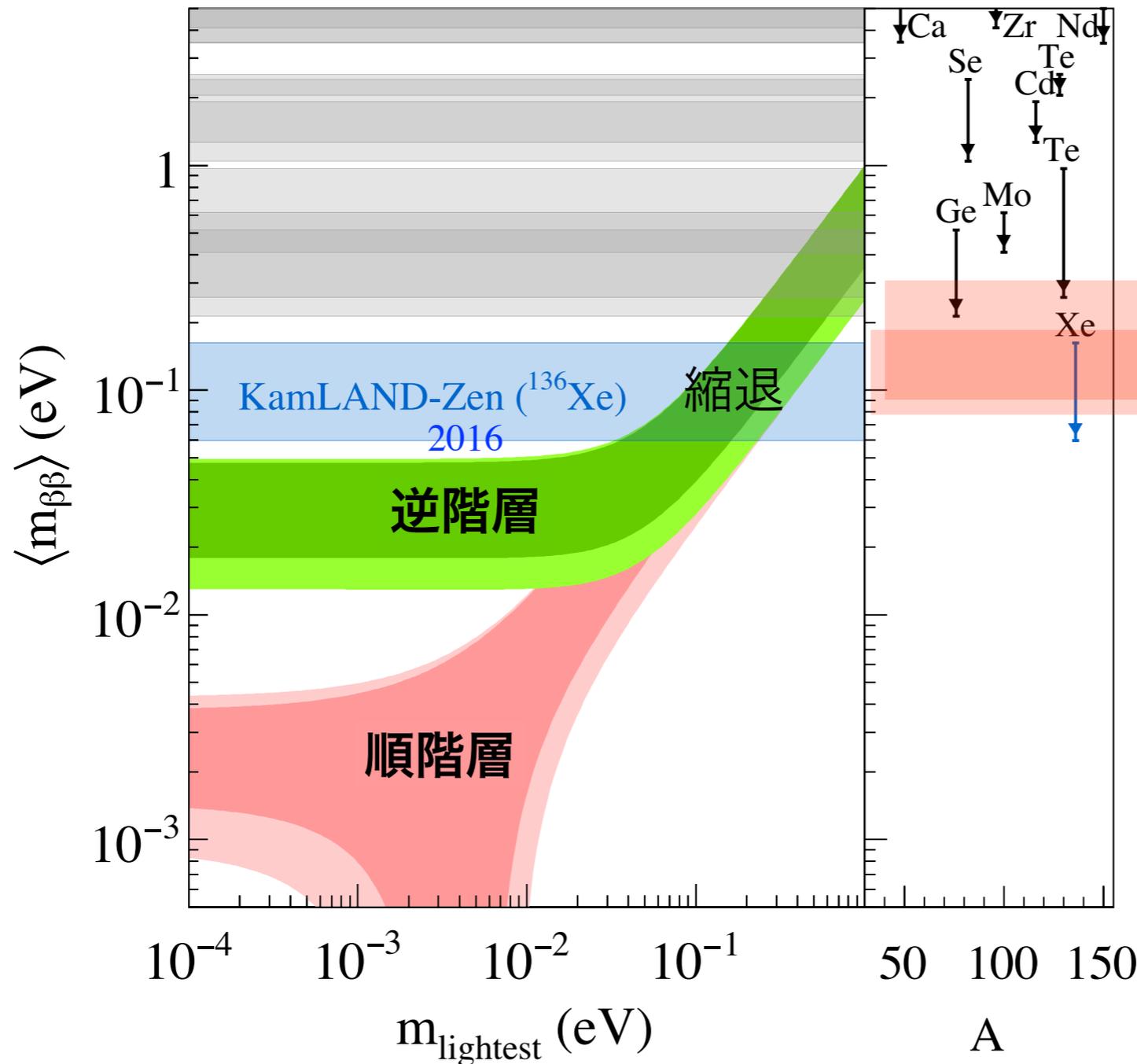
現在は使用済み燃料
からの回収に注目、
100トンも視野に！

KamLAND-Zen 400 Phase 1+2 combined

2011年開始

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

(sensitivity $5.6 \times 10^{25} \text{ yr}$)



まだリードしているが、米国では次期計画の選定が進行中。
nEXO, LEGEND, CUPID

CUORE 2021 $< 90-305 \text{ meV}$

GERDA 2021 $< 79-180 \text{ meV}$

It also provides upper limit of m_{lightest} at 180-480 meV.

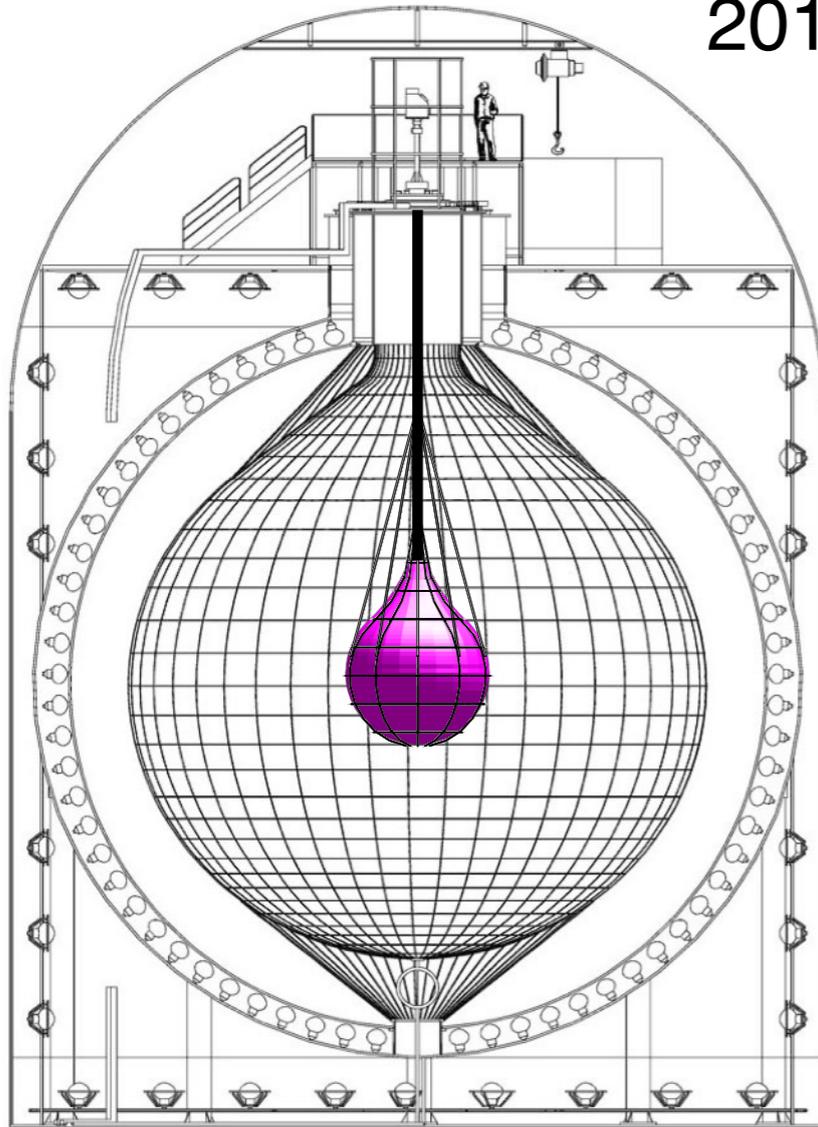
$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < (61 - 165) \text{ meV}$$

PRL117, 082503 (2016)

逆階層領域 (IH) 目前まで一気に感度を向上

KamLAND-Zen 400

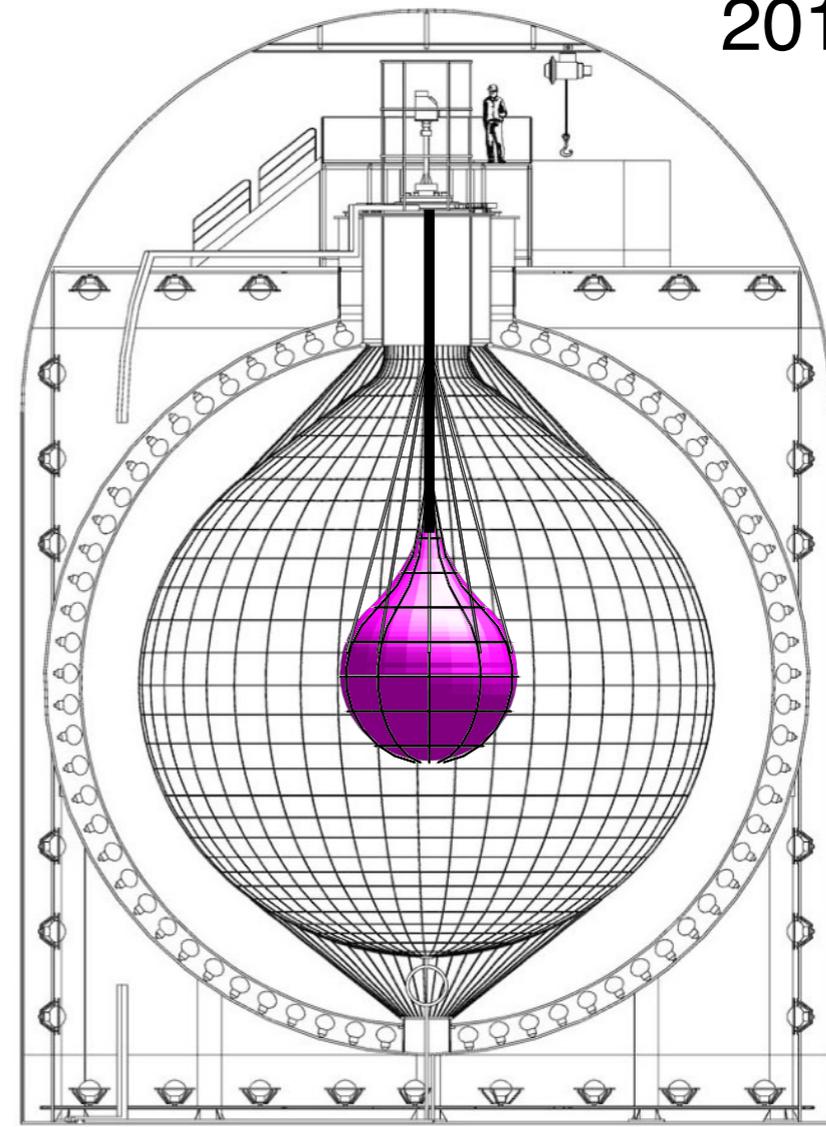
2011-2015



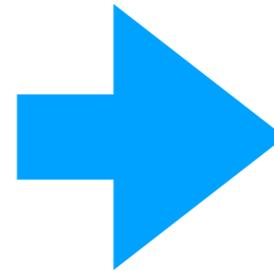
380kg

KamLAND-Zen 800

2019-



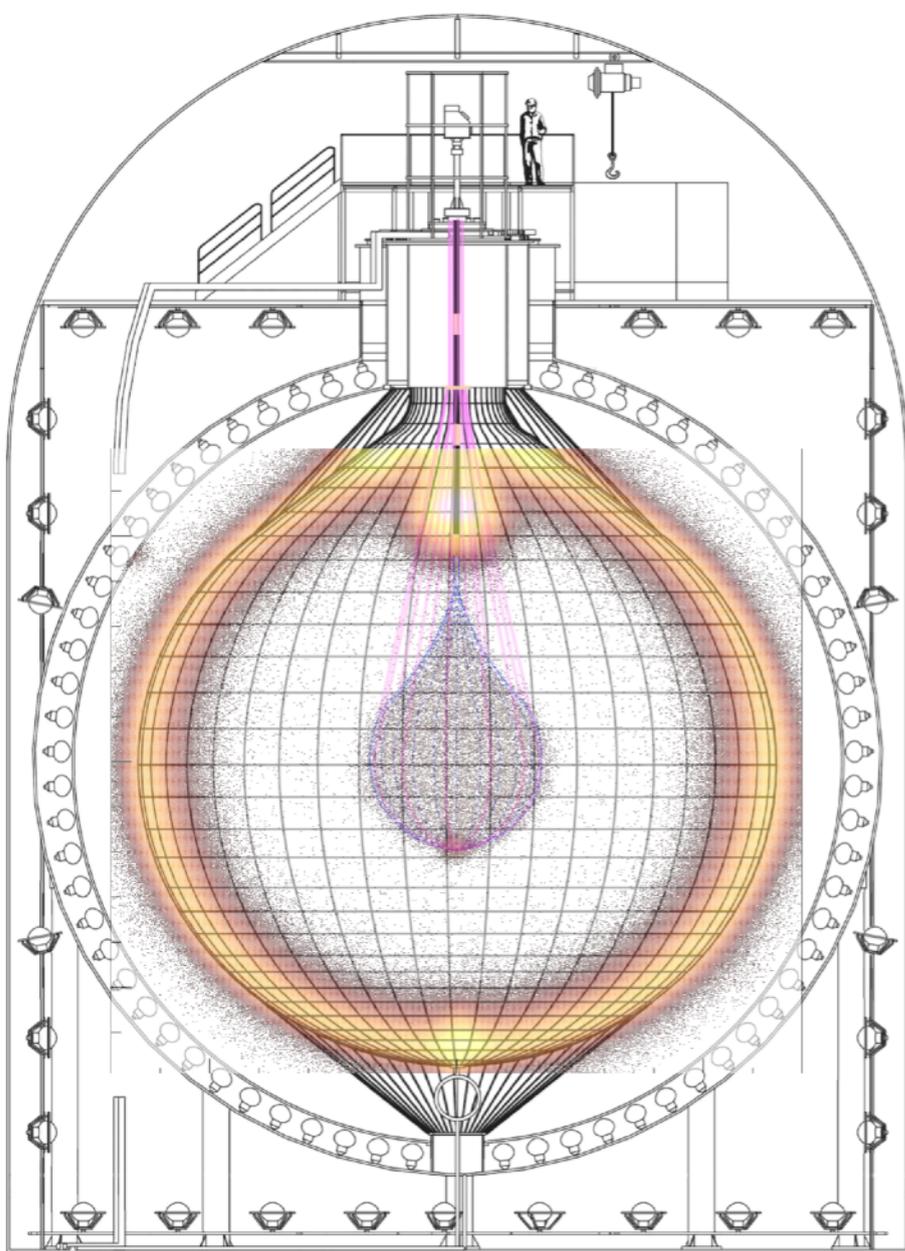
745kg



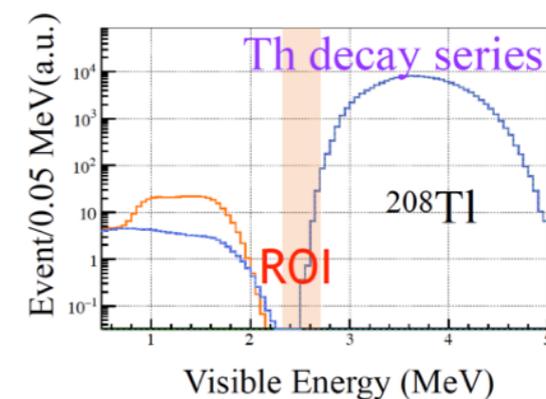
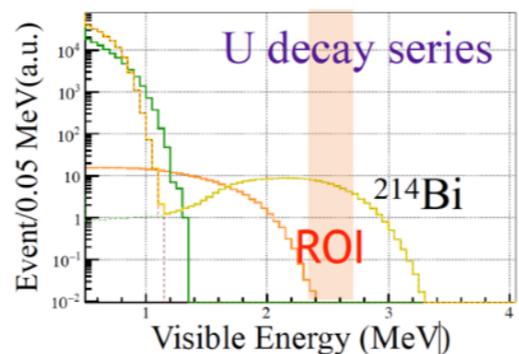
KamLAND-Zen 800 現状

放射性不純物

KamLAND-Zen 800
での反応点分布



(1.0 MeV-3.0 MeV Singles)

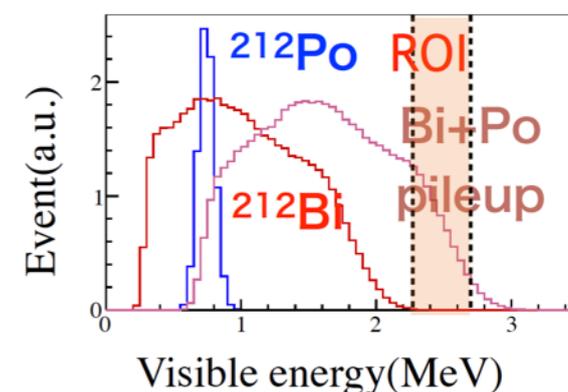


ミニバルーン以外
214Bi-214Po計測で十分低減

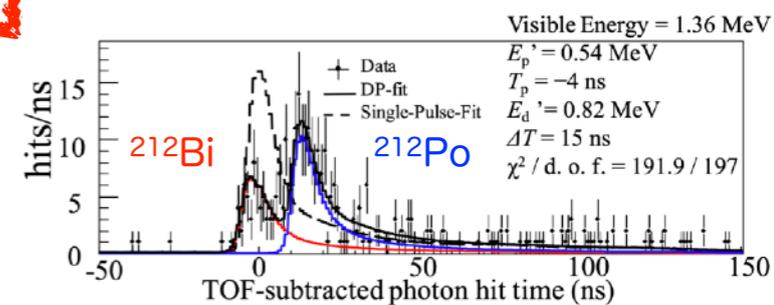


蛍光ミニバルーン (将来)

212Bi-212Poは時間差が短い

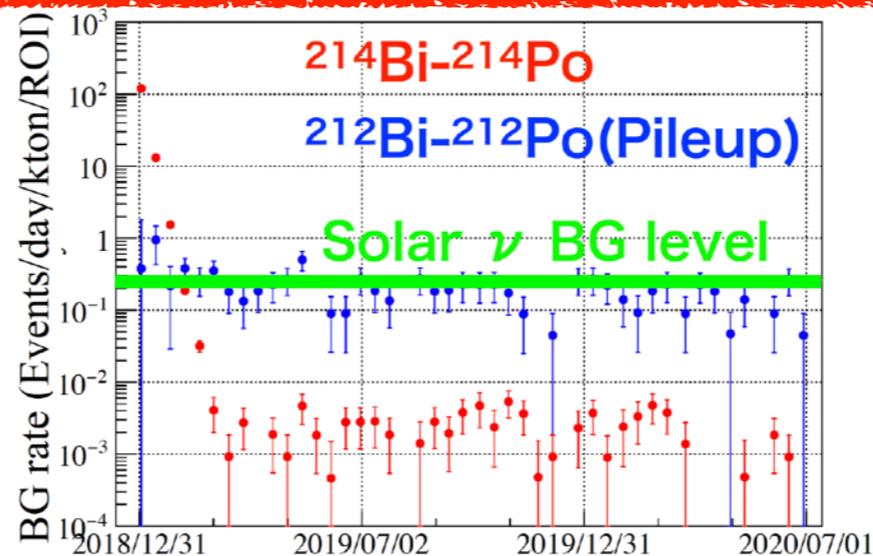


10ns以上は判別可能



ニューラルネット (進行中)

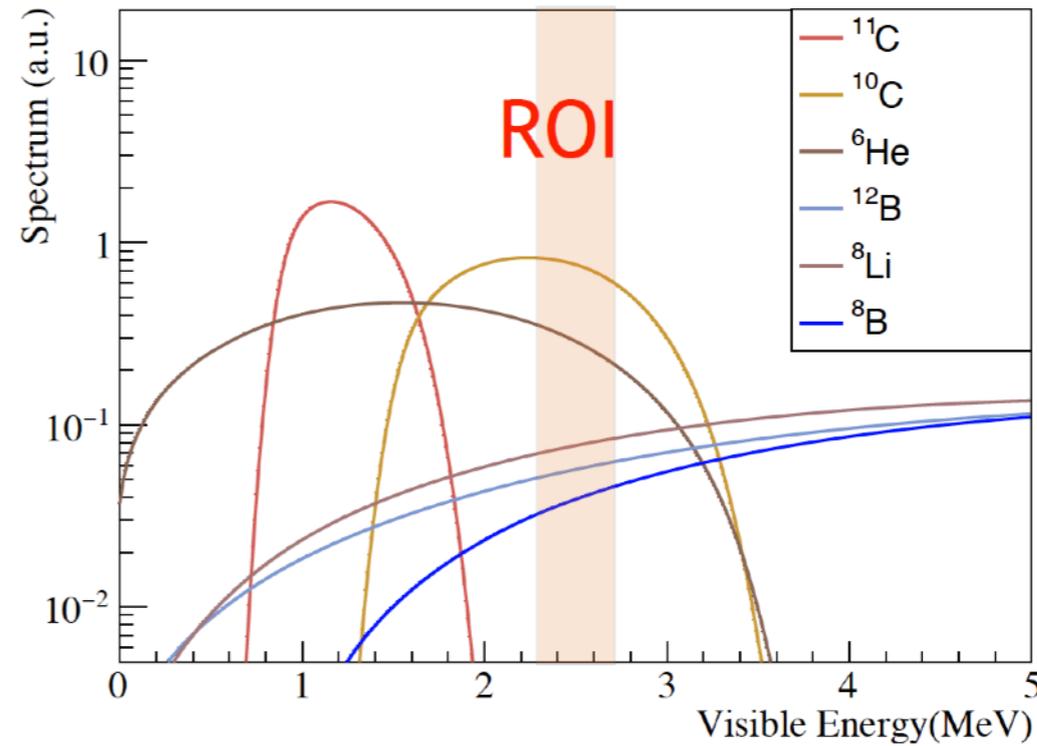
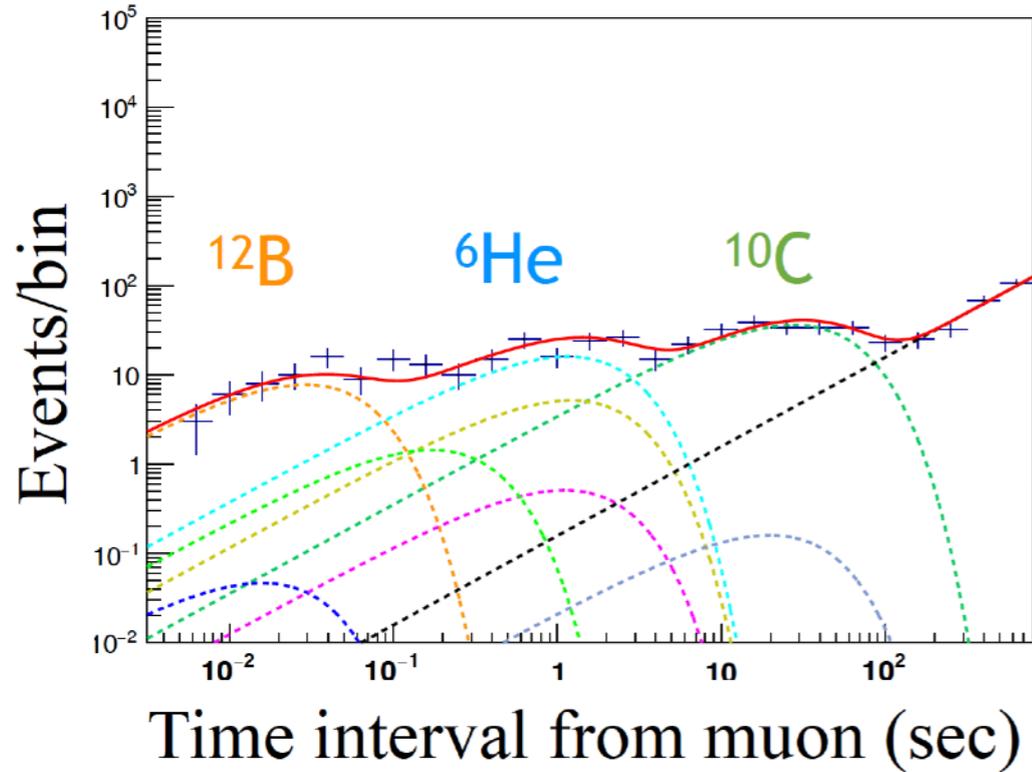
放射性不純物の影響は太陽ニュートリノ以下に抑えている



宇宙線による原子核破碎

^{12}C 破碎はKamLAND全体を使って測定可能

E-Range (MeV) : 2 - 3

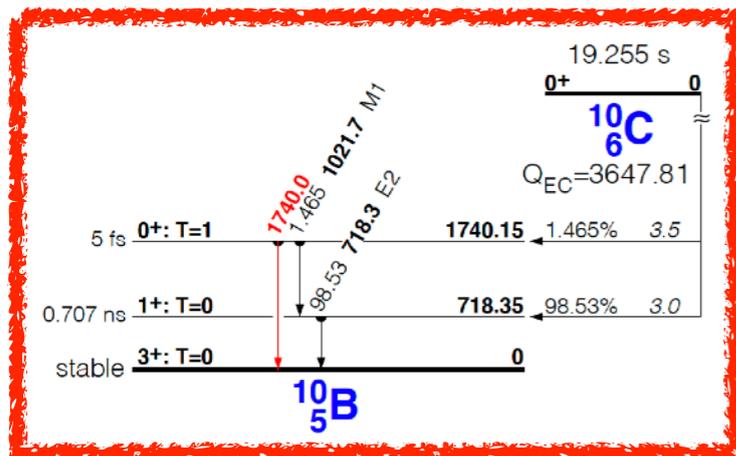


半減期

- 20.39 min
- 19.255 s
- 806.7 ms
- 20.20 ms
- 838 ms
- 770 ms

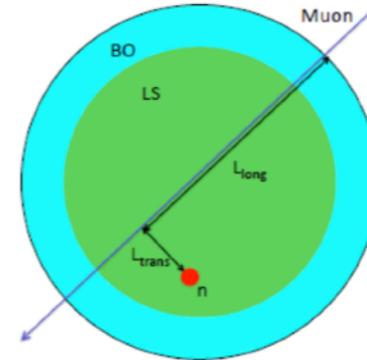
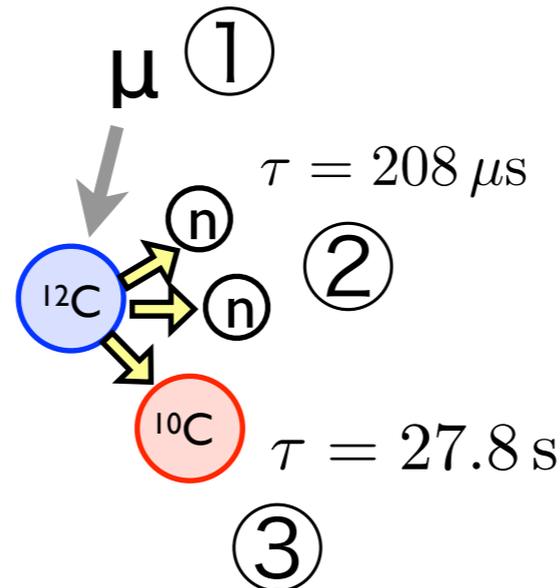
^{10}C

$T_{1/2} = 19\text{ s}$

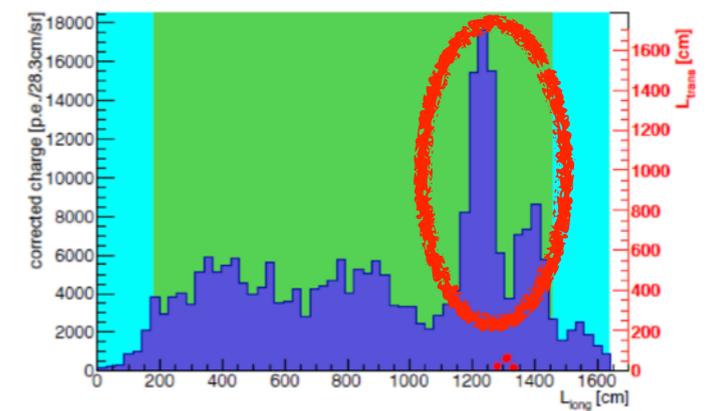


○中性子タグ

○シャワータグ (低中性子捕獲率でも可)



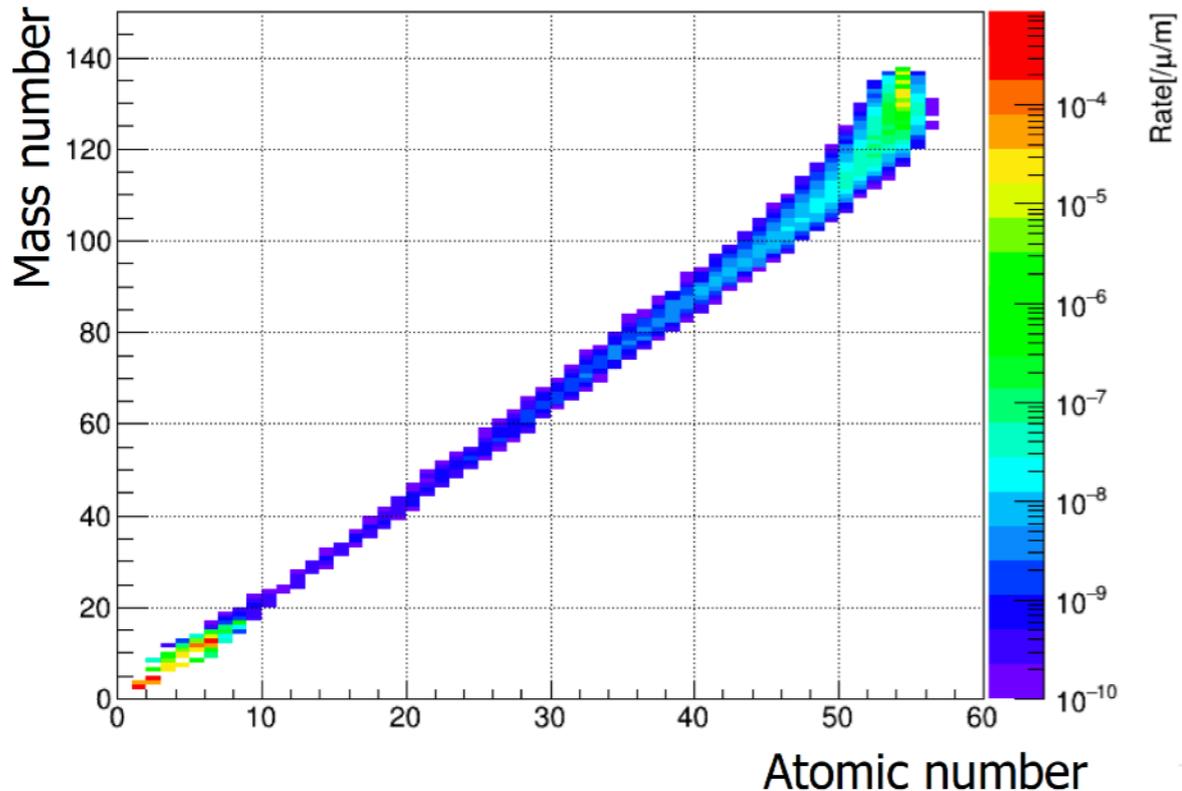
トラックに沿った発光量



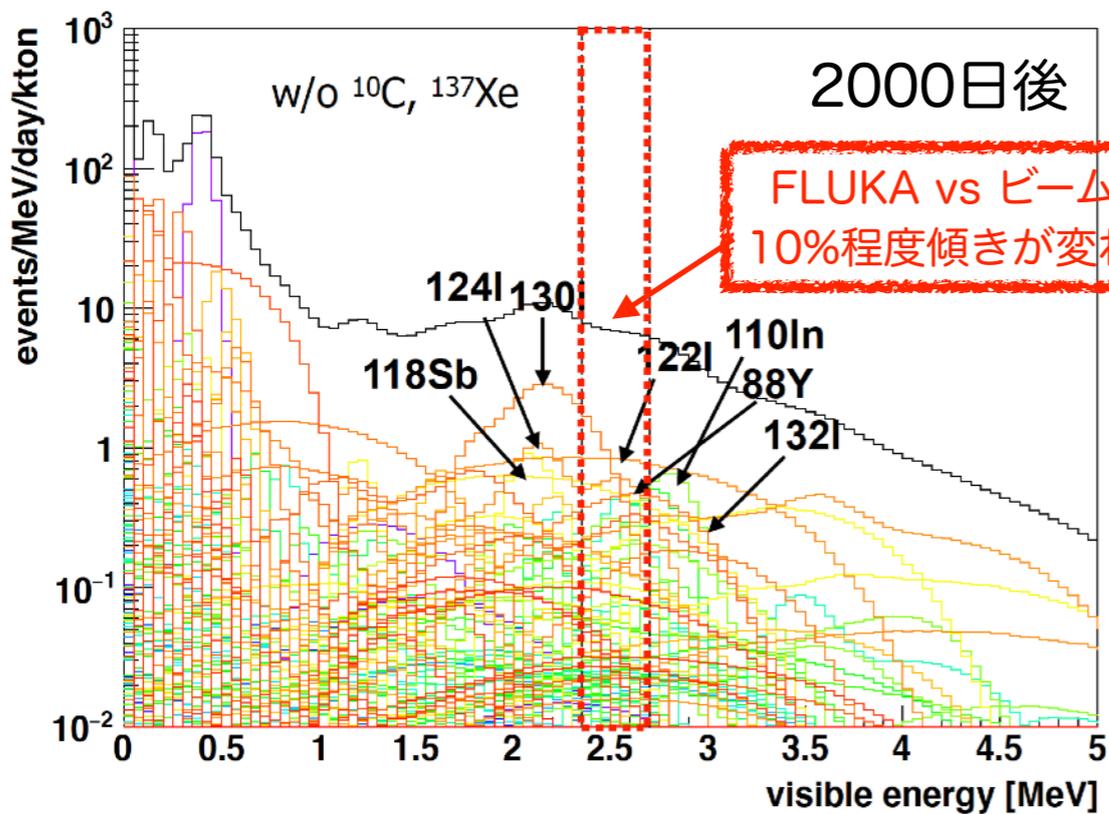
○ニューラルネット (r 全般に有効)

^{136}Xe 破砕は情報不足

Xeの核破砕生成 (FLUKA)



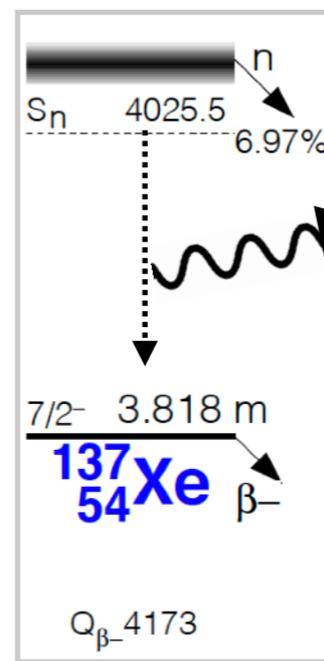
GEANT+ENSDF でシミュレーション



FLUKA vs ビーム実験で
10%程度傾きが変わり得る

ほとんどは γ を伴う (ニューラルネットが有効)

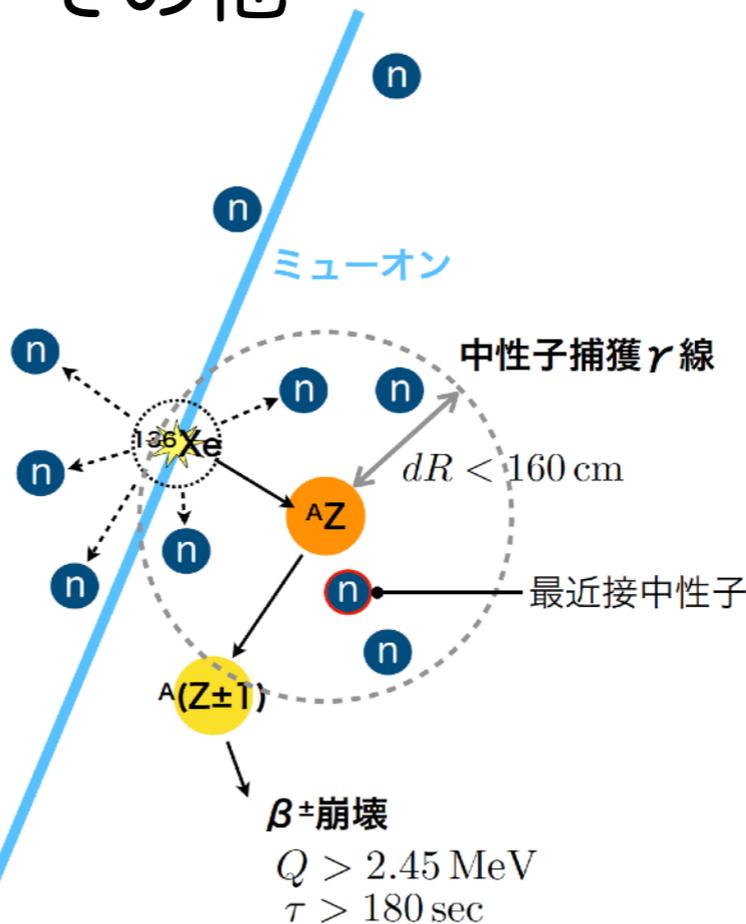
^{137}Xe



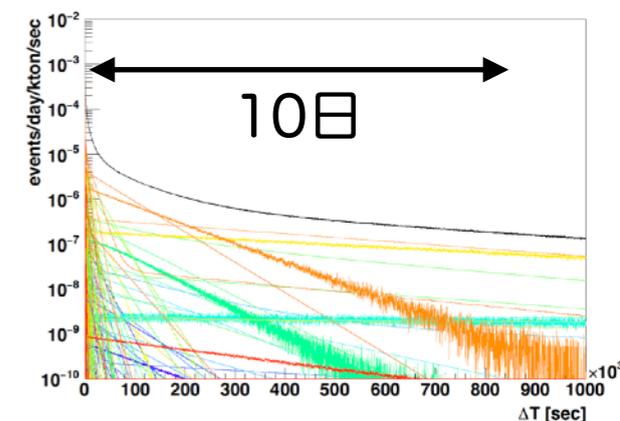
4MeVの特徴的な
中性子捕獲 γ
による識別

Q値4.2MeV

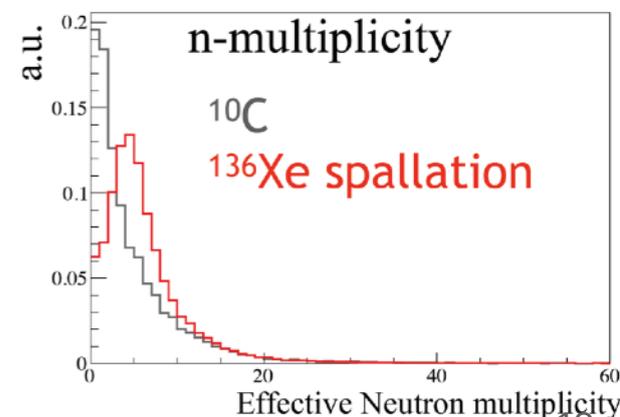
その他



寿命が長い



中性子多重度が有効



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

Backgrounds (R<157 cm)

Zen 800 ROI: $2.35 \text{ MeV} < E < 2.70 \text{ MeV}$,
 2019年開始 $0\nu\beta\beta$ efficiency $\sim 90\%$

(Gando @TAUP2019)

Source: $2\nu\beta\beta$
 Radioactive impurities: Xe-LS, IB and outer-LS
 Cosmogenic: muon-spallation Solar neutrino ES

$2\nu\beta\beta$ tail due to energy resolution

Most dominant & inevitable BG

$\Delta E \sim 4.5\% @ 2.45 \text{ MeV} \sim 5.1 \text{ events/ROI}$

^{214}Bi from IB film

Vertex resolution $\sim 15 \text{ cm}/\sqrt{E(\text{MeV})}$

Limit sensitive region to $0\nu\beta\beta$ decay.

$\sim 0.9 \text{ events/ROI}$

^{12}C spallation products

Significantly reduced by new analysis methods

$\sim 0.2 \text{ events/ROI}$

Solar neutrino electron scattering + C.C. (^{136}Cs)

Inevitable BG

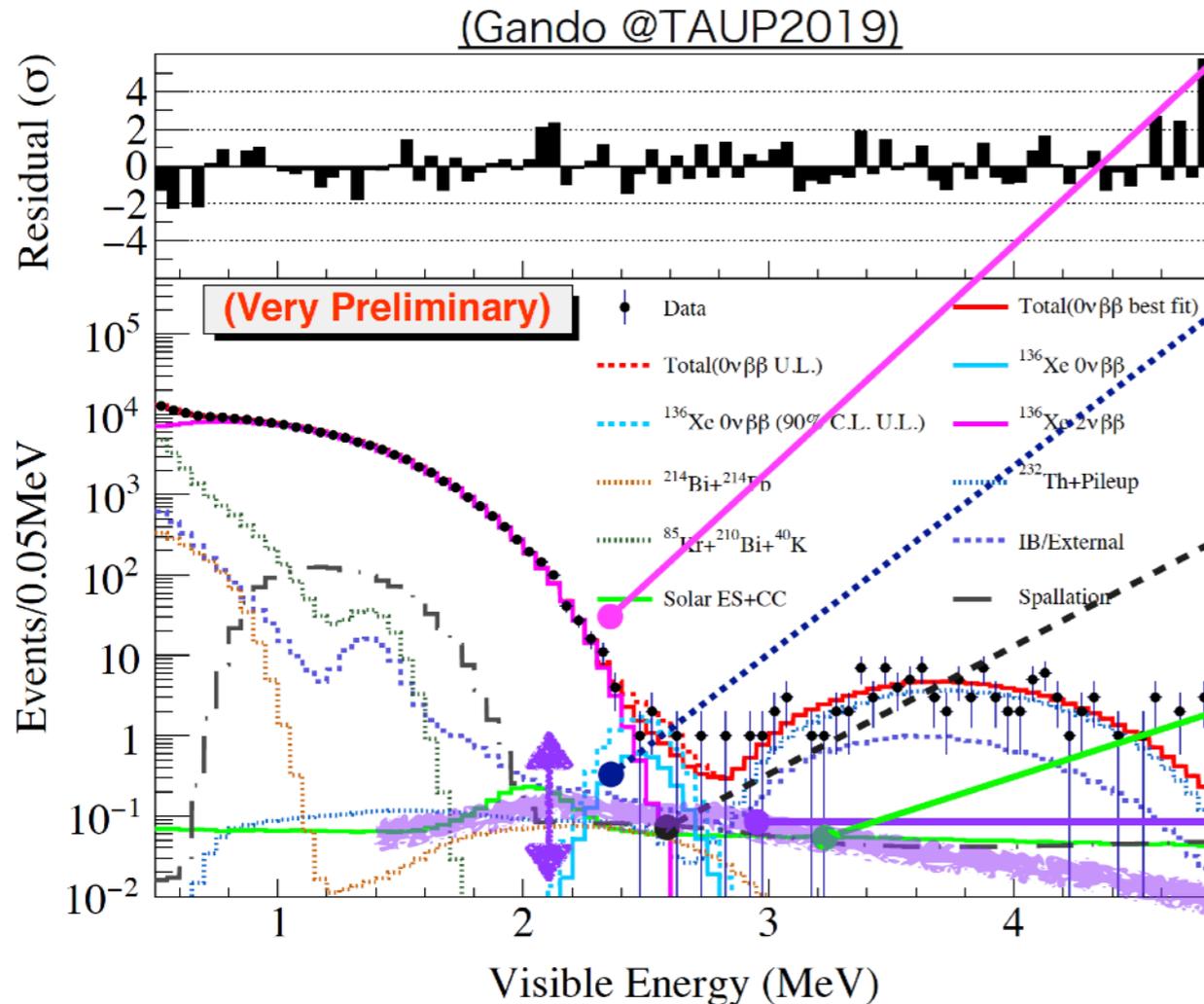
$\sim 0.4 \text{ events/ROI}$

^{136}Xe spallation products

Nuisance BG in Zen800

Hard to reject because of their long-lives

Ozaki @ Neutrino Telescope 2021



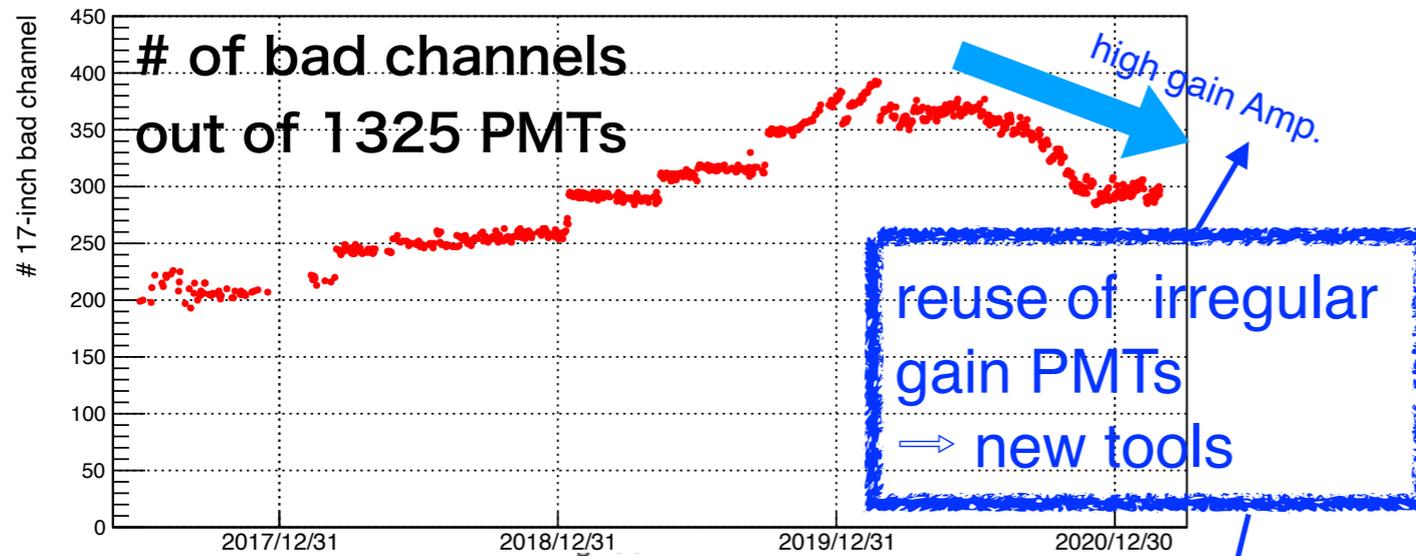
Preliminary Sensitivity $8 \times 10^{25} \text{ yr}$, Limit $> 4 \times 10^{25} \text{ yr}$
 (Zen 400: $5.6 \times 10^{25} \text{ yr}$, $> 10 \times 10^{25} \text{ yr}$)

^{12}C 以外の原子核破碎の理解を進めないといけない。

PMTの故障頻度が高いため、位置・エネルギー再構成プログラムの最適化が必要。

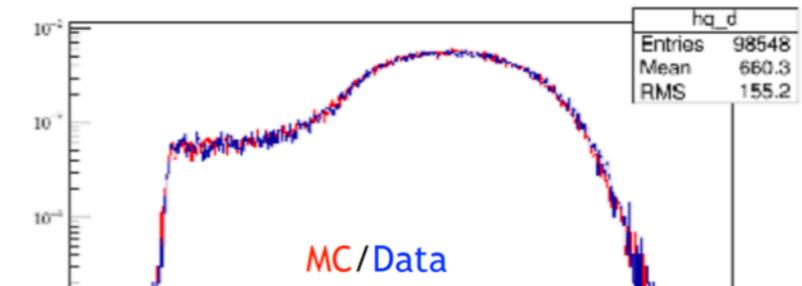
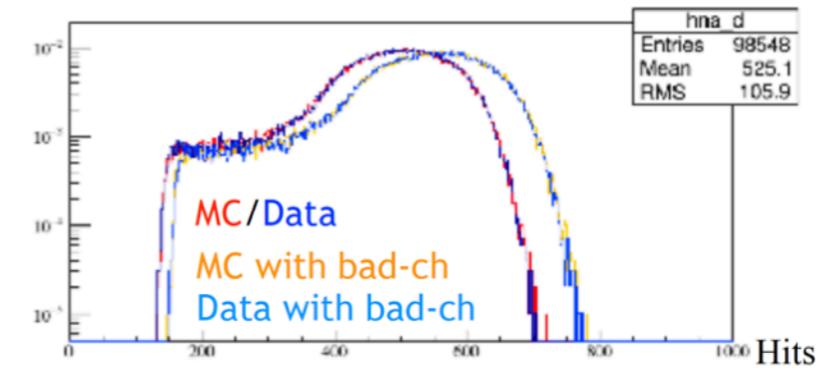
そうこうしているうちにTAUP2019の3倍超のデータが蓄積されている。

Rapid aging of KamLAND PMTs is serious.



Bi214

of hit PMTs



このままでは継続できず、改修が必要！

液体シンチレータ排出が必要だが保管場所なし

「4. 神岡茂住坑での大型アクティビティ継続」にも関連

number of wounded PMTs
gain largely lowered (HV reduced)

2017 2018 2019 2020

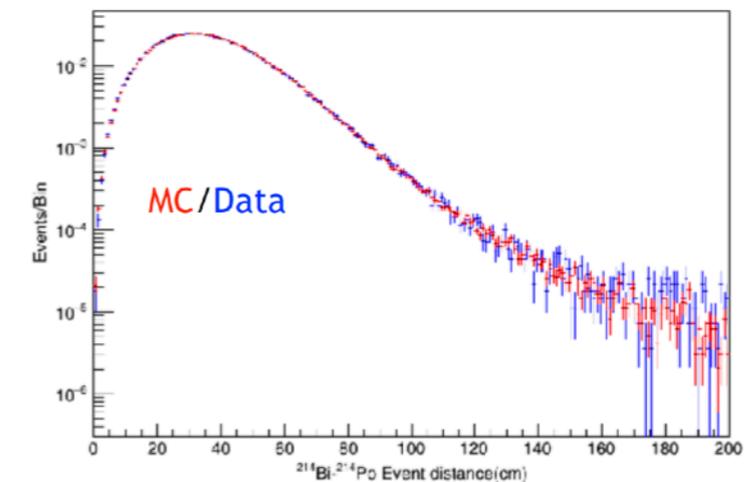
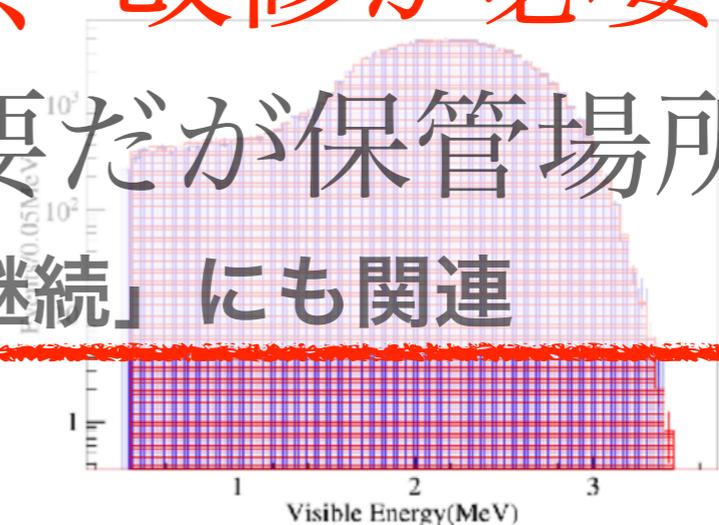
Very fine tuning of the simulation is necessary.

- timing distribution
- hit distribution
- charge response
- vertex distribution
- energy scale
- energy resolution
- their time dependence
- their position dependence
- ...

These are also important for neural-net analysis.

very time consuming

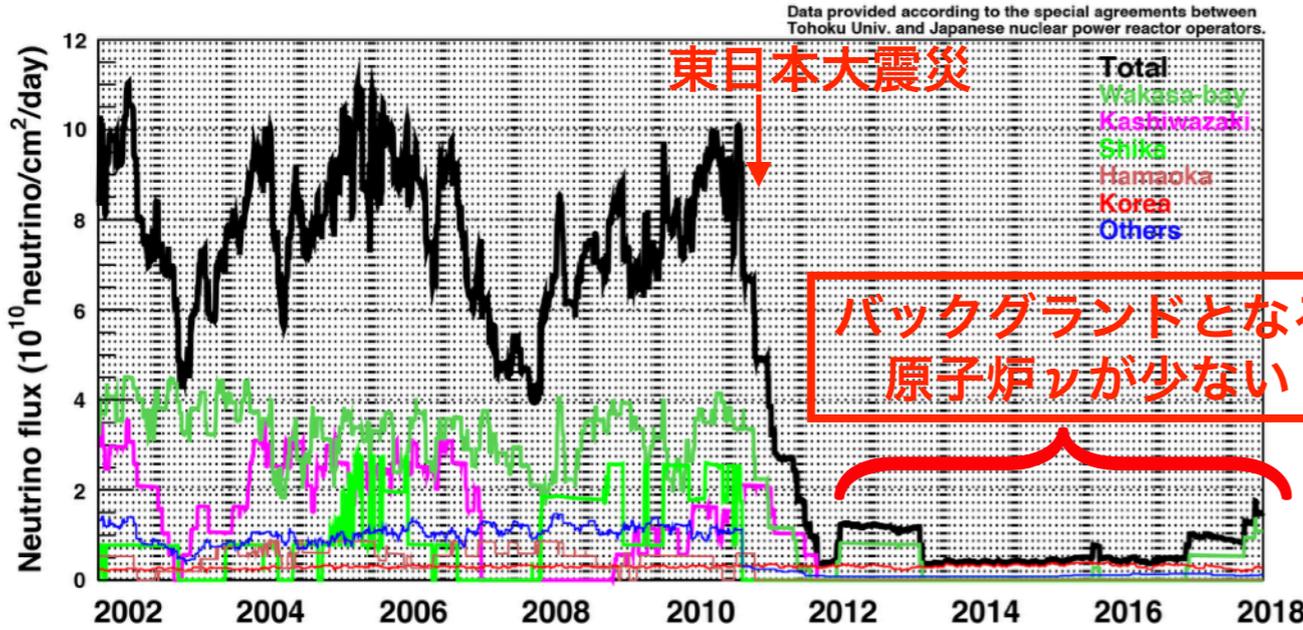
Sorry, this is an excuse for slow data update.



2. 「地球の始源隕石」「地球内部のダイナミクス」 解明に挑む。

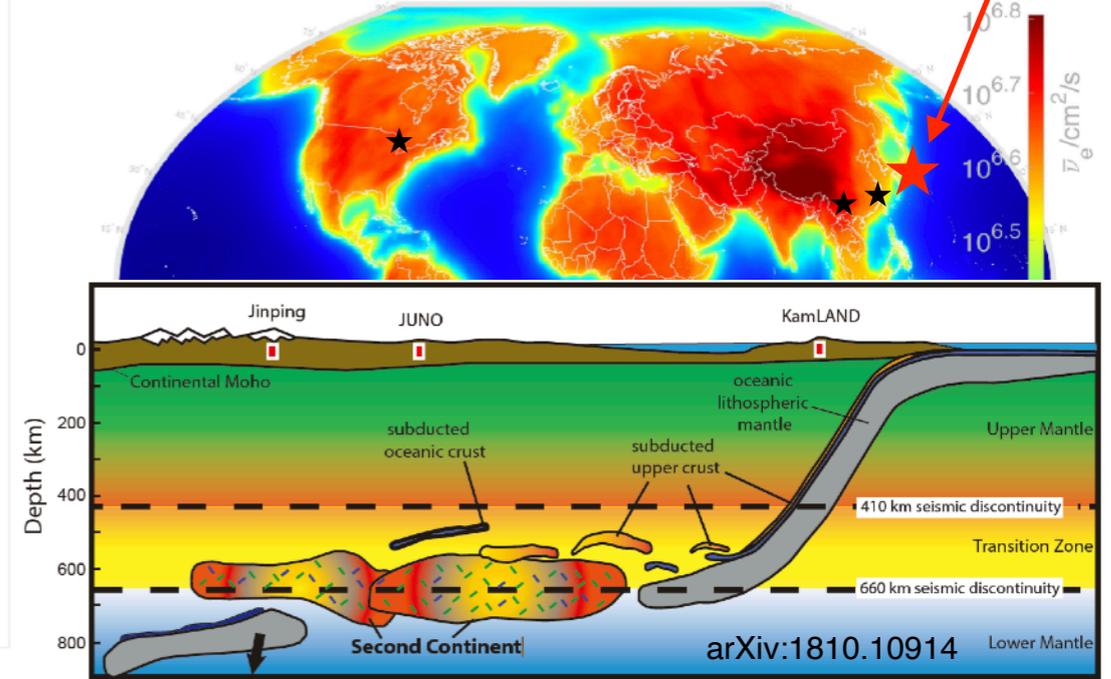
地球ニュートリノ観測

BG源となる原子炉の運転状況

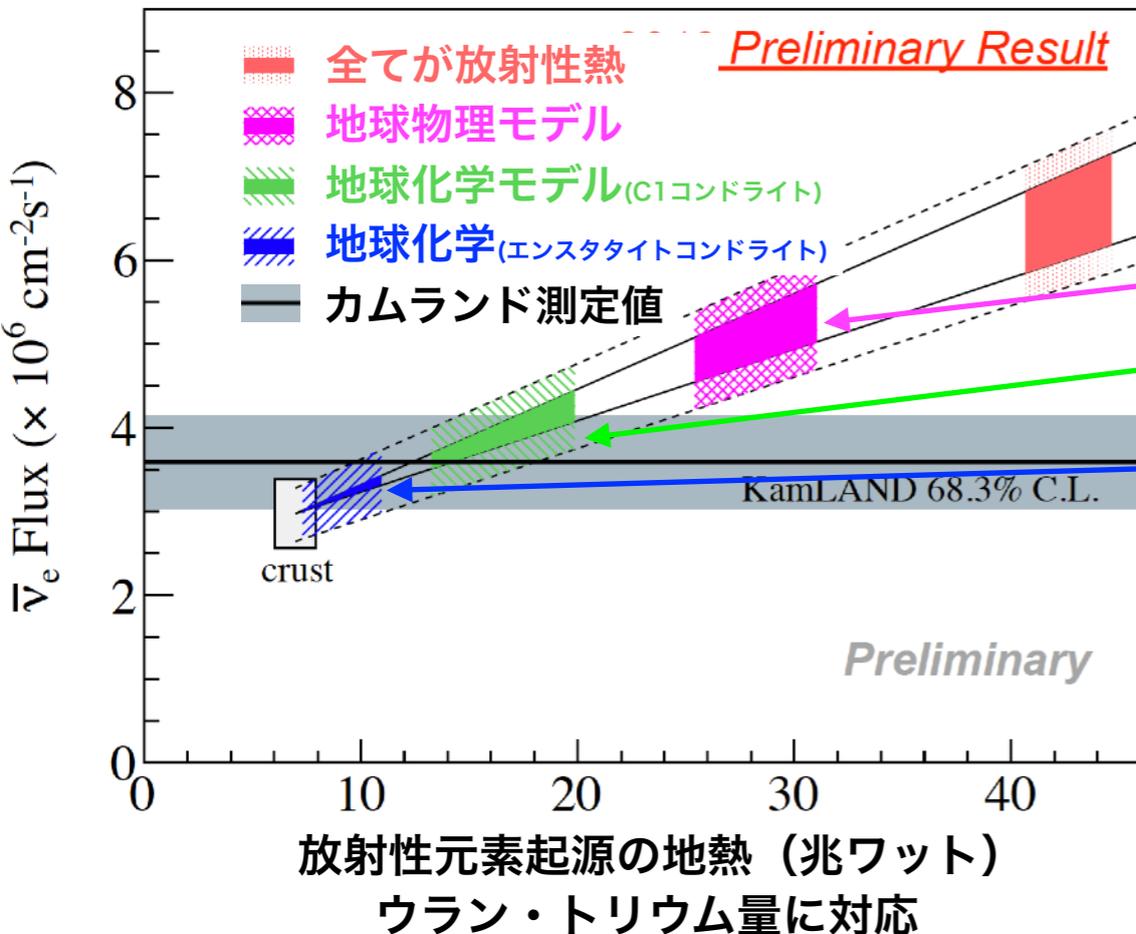


今後も 地球ニュートリノ観測網で最重要

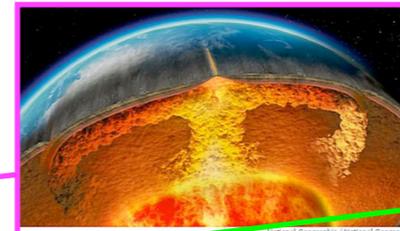
唯一大陸プレートの端



第2大陸：地表の6倍？



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



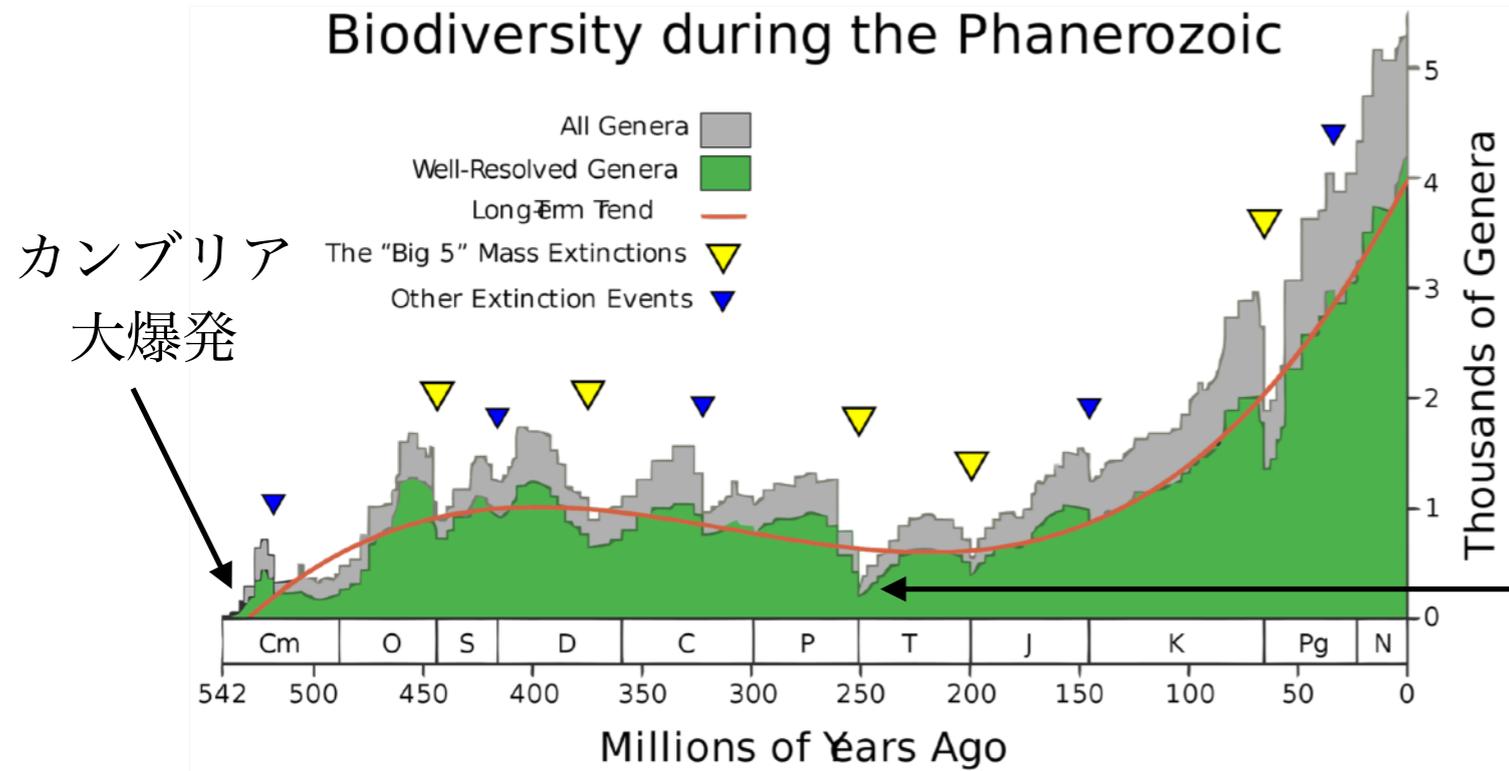
元素比の一致する
C1コンドライト
(地球化学モデル)



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)

さらにデータを蓄積して、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!!!

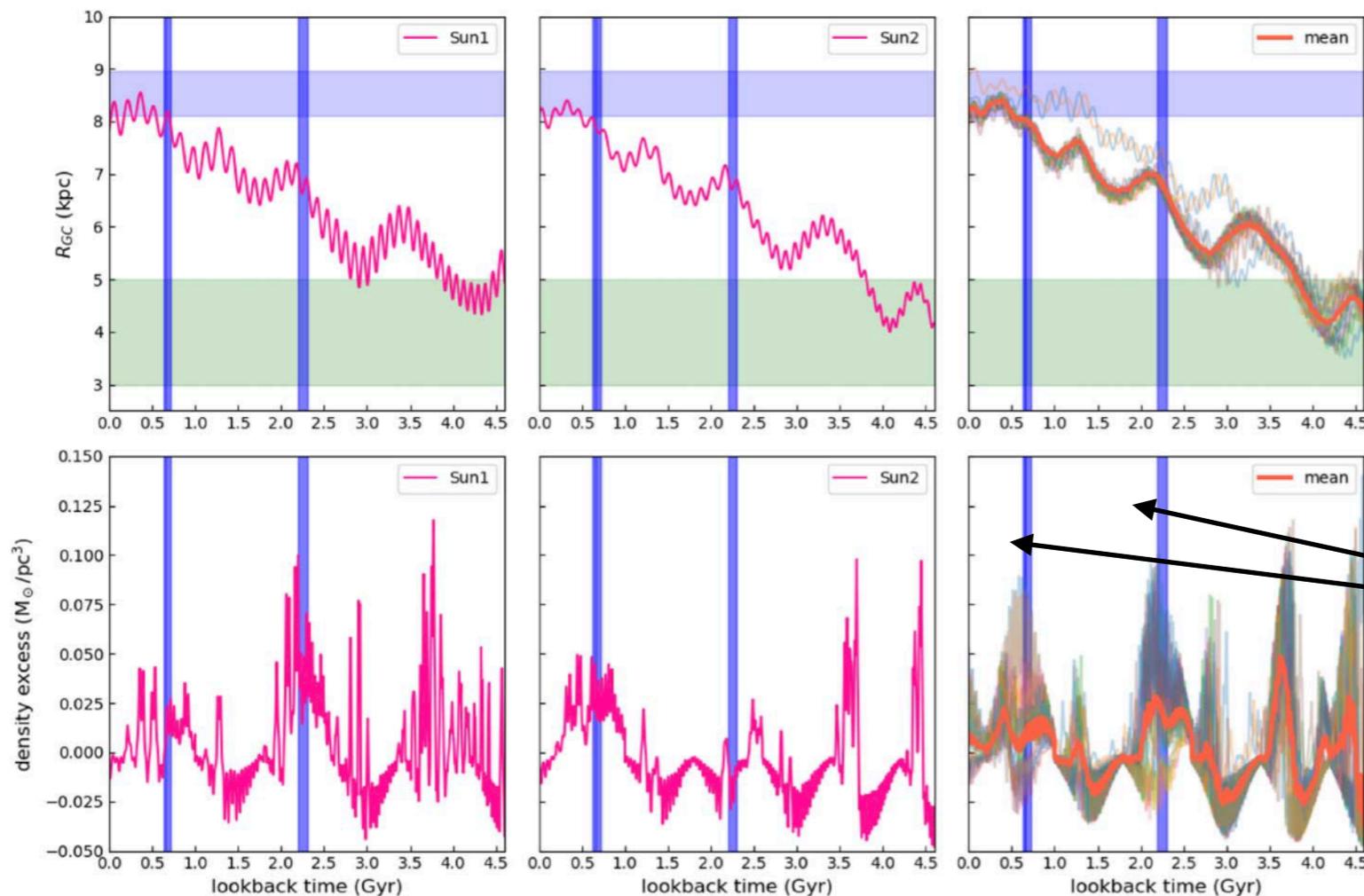
地熱に加え、太陽系の銀河内での運動と地球史との関係が注目されている



カンブリア
大爆発



パンゲア下の地熱集中をきっかけとした大規模火山活動？



ApJ, 904: 137, 2020

24.3億年前 ヒューロニアン氷河時代

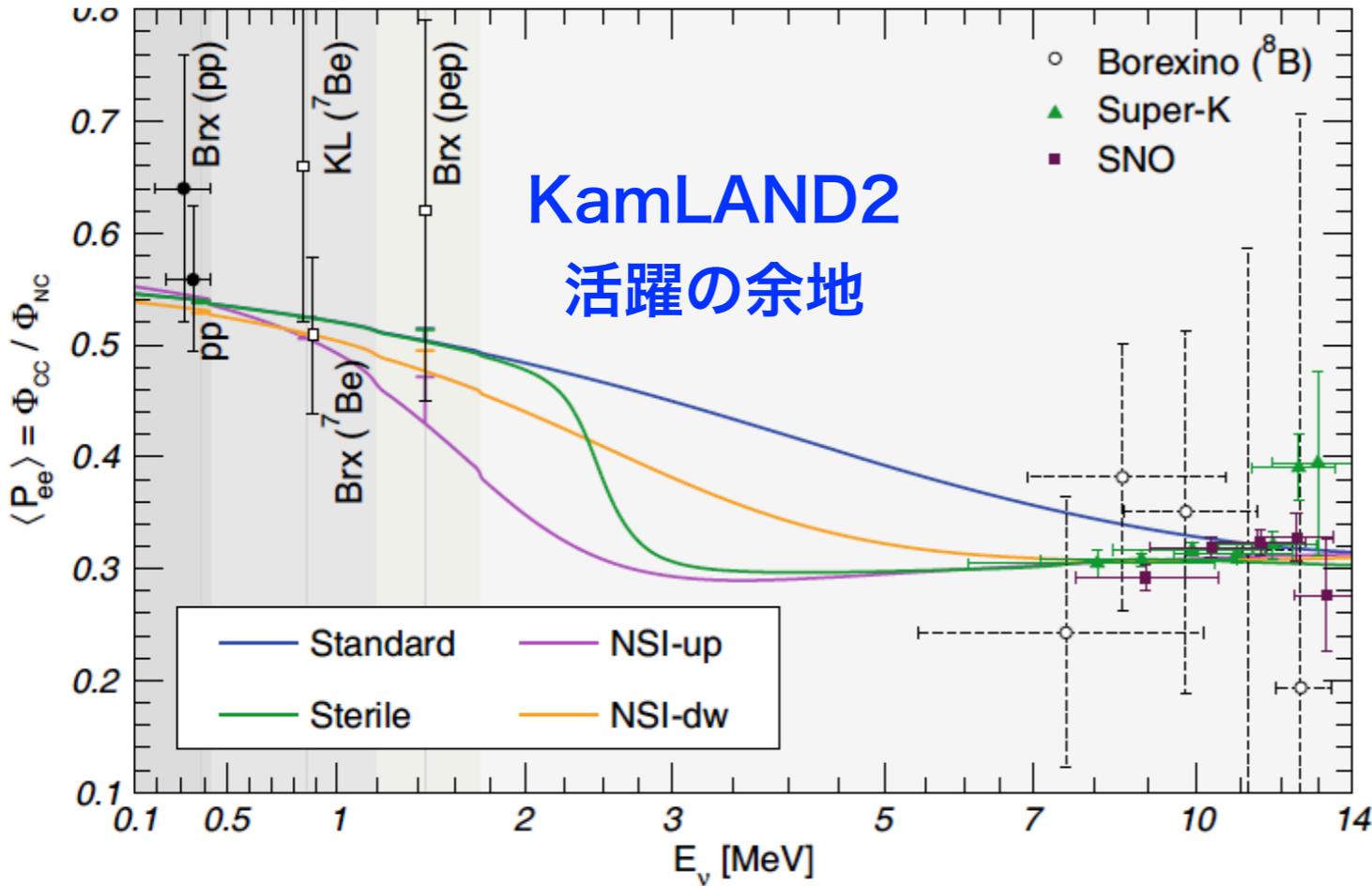
7.17億年前 スターチアン氷河時代

6.50億年前 マリノアン氷河時代

snowball earth

3. 低エネルギーニュートリノ天文学(マルチメッセンジャー天文学)

Eur. Phys. J. A(2016)52:87



2~4 MeVが面白い

小さいMSW upturnの検証
NSI の探索

208Tl が問題

小さいBorexino (終了) は不可

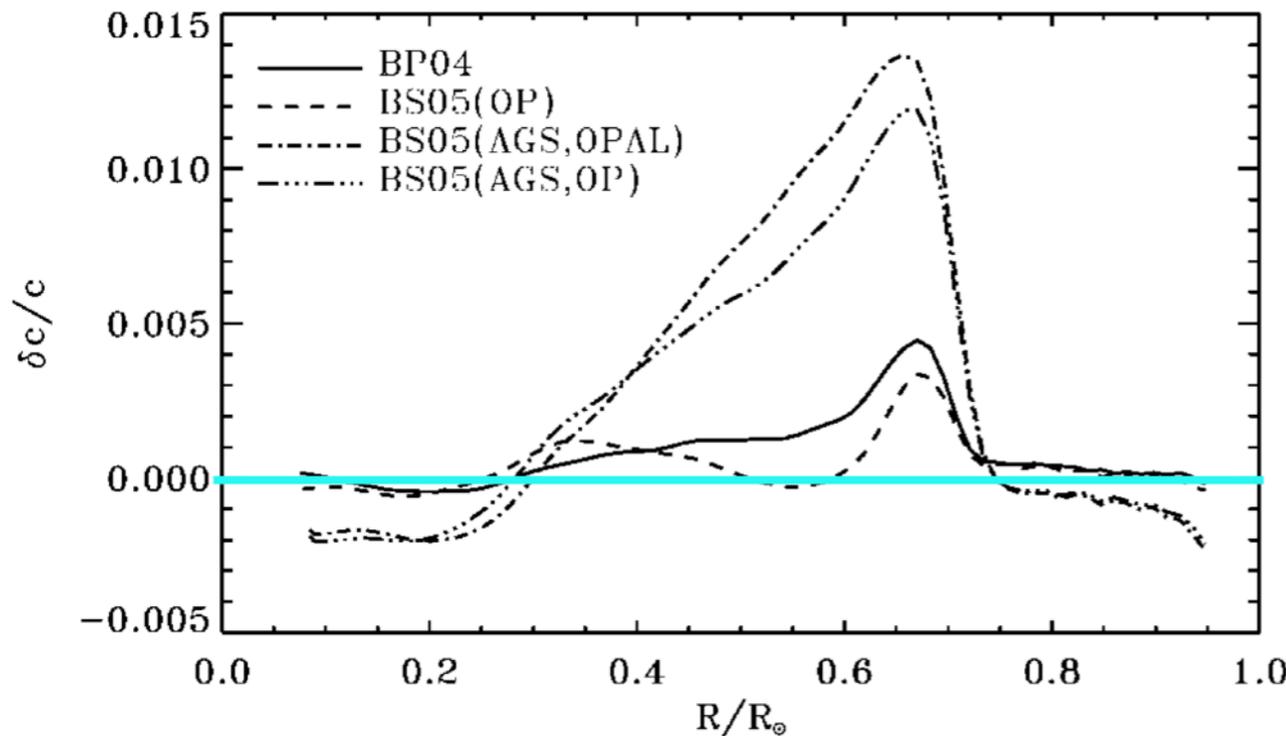
214Bi が問題

LSなら214Poをタグ可能

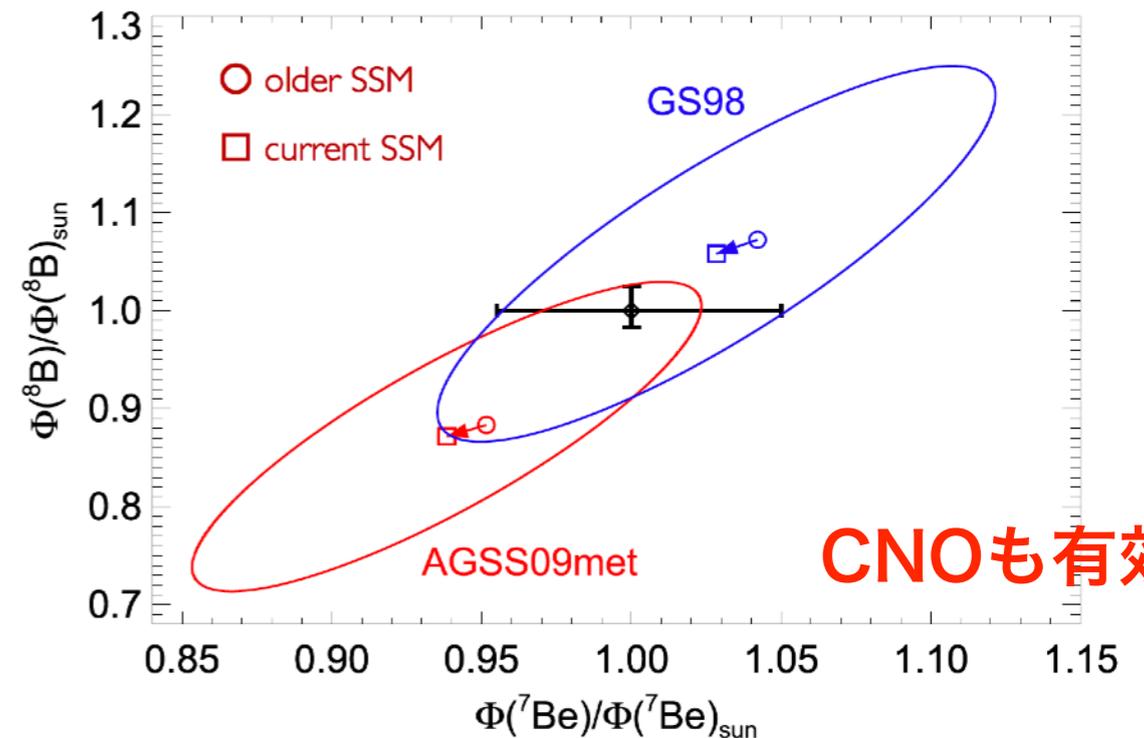
11C が問題

中性子捕獲、機械学習が進展

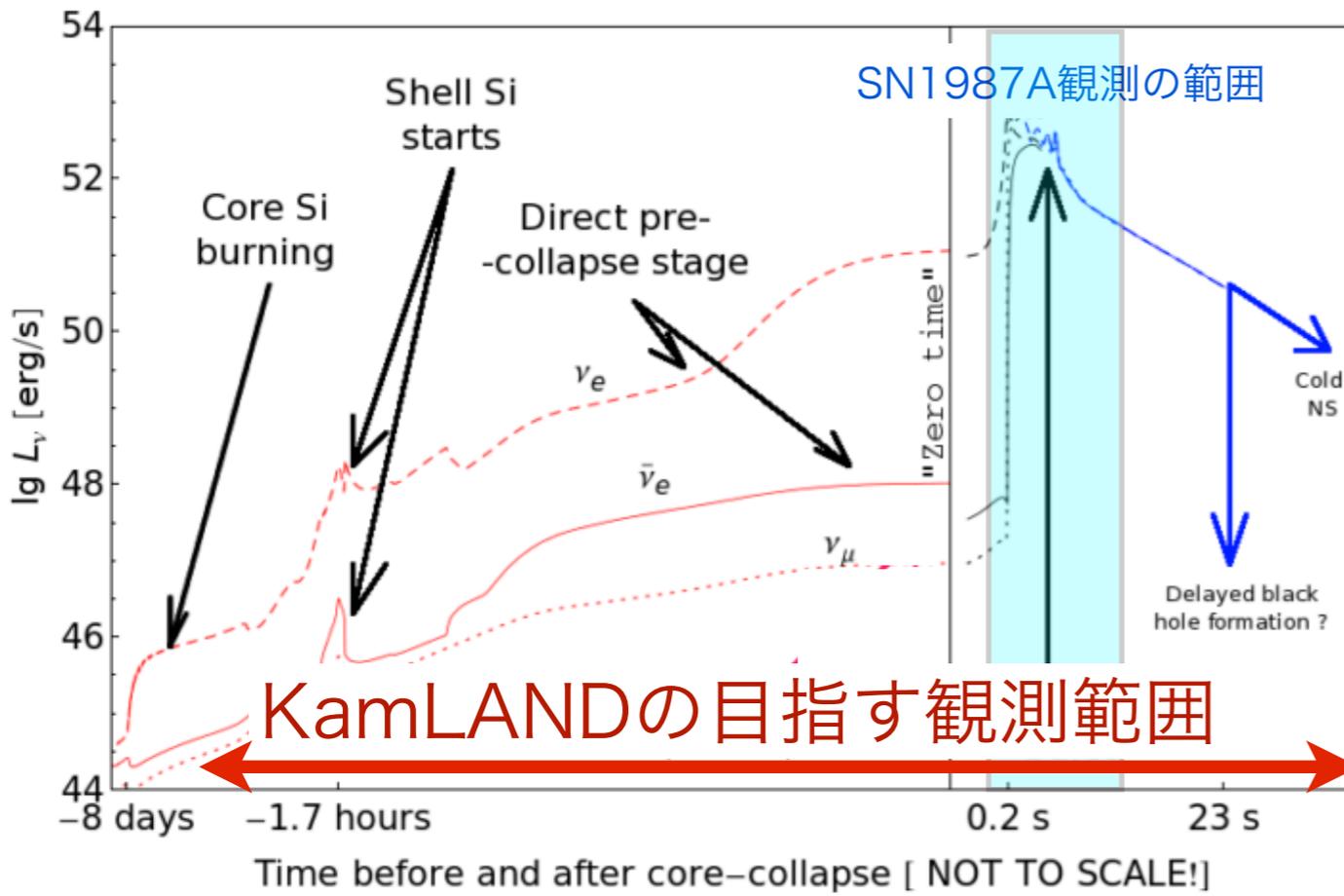
Bahcall et al. (2005)



太陽組成問題は未解決



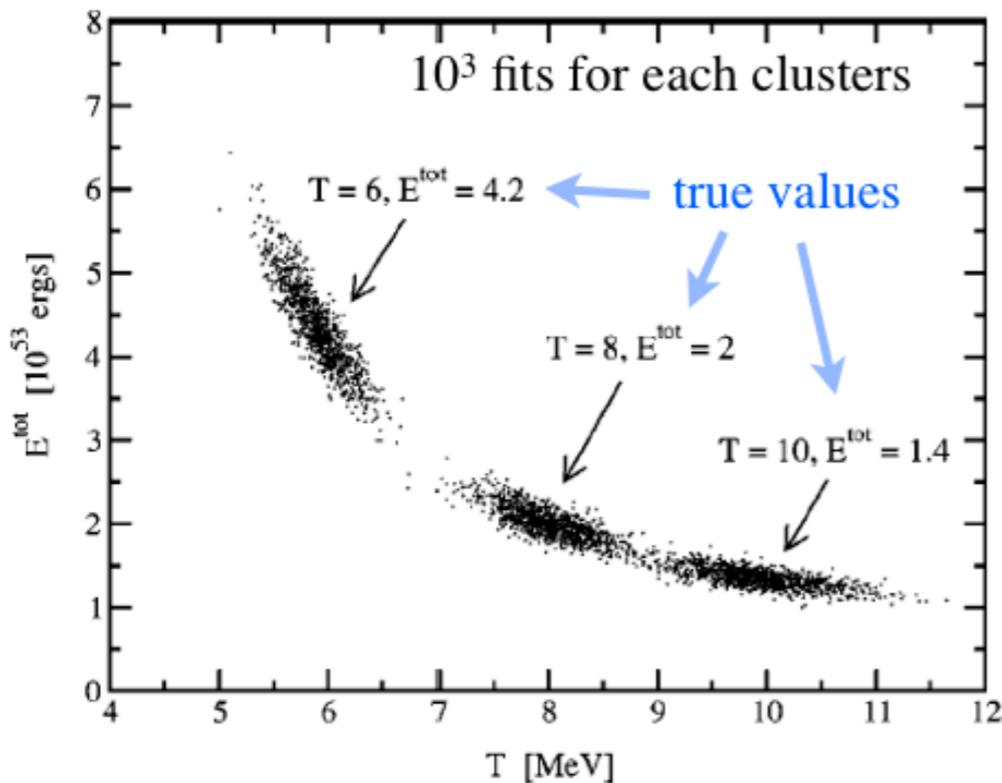
● 特徴的な超新星ニュートリノ観測



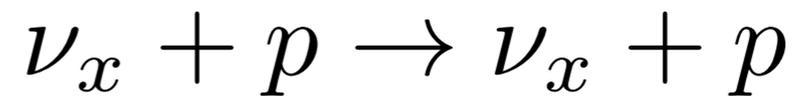
● 超新星ニュートリノ
⇒ 光学観測への速報 (数時間前)

● 極近傍超新星前兆ニュートリノ
⇒ ν ・重力波・光学観測へ速報 (数日前)
(Webで有意度情報を発信中)

候補の近傍天体

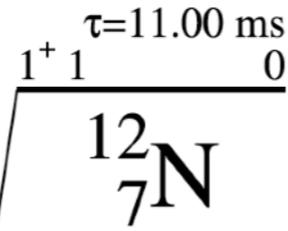
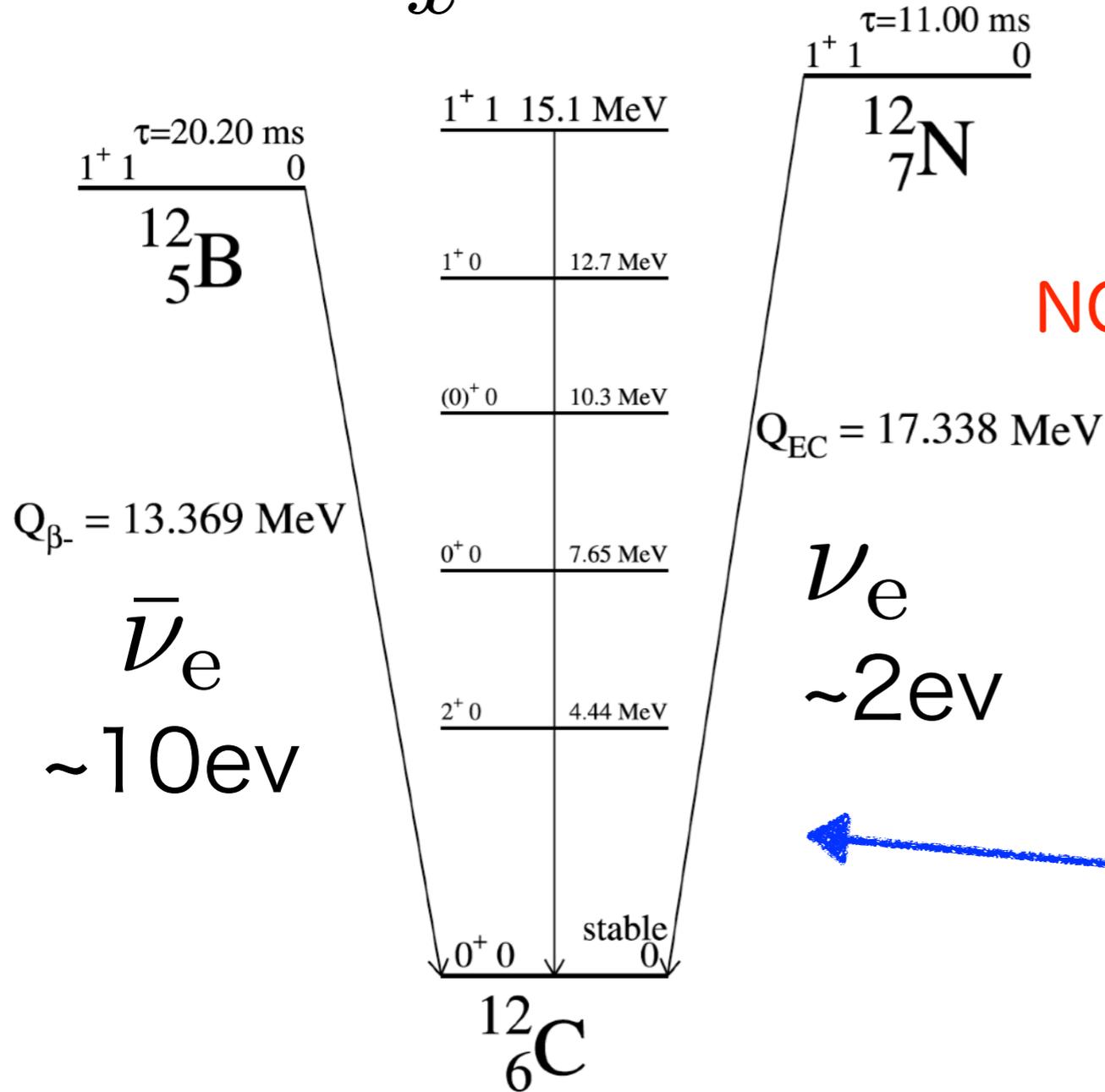


● 陽子反跳測定による、温度と明るさの同時観測



10kpc Type-II 3×10^{53} erg を仮定

NC $\nu_x \sim 60\text{ev}$



$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \sim 250\text{ev}$$

$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \sim 15\text{ev}$$

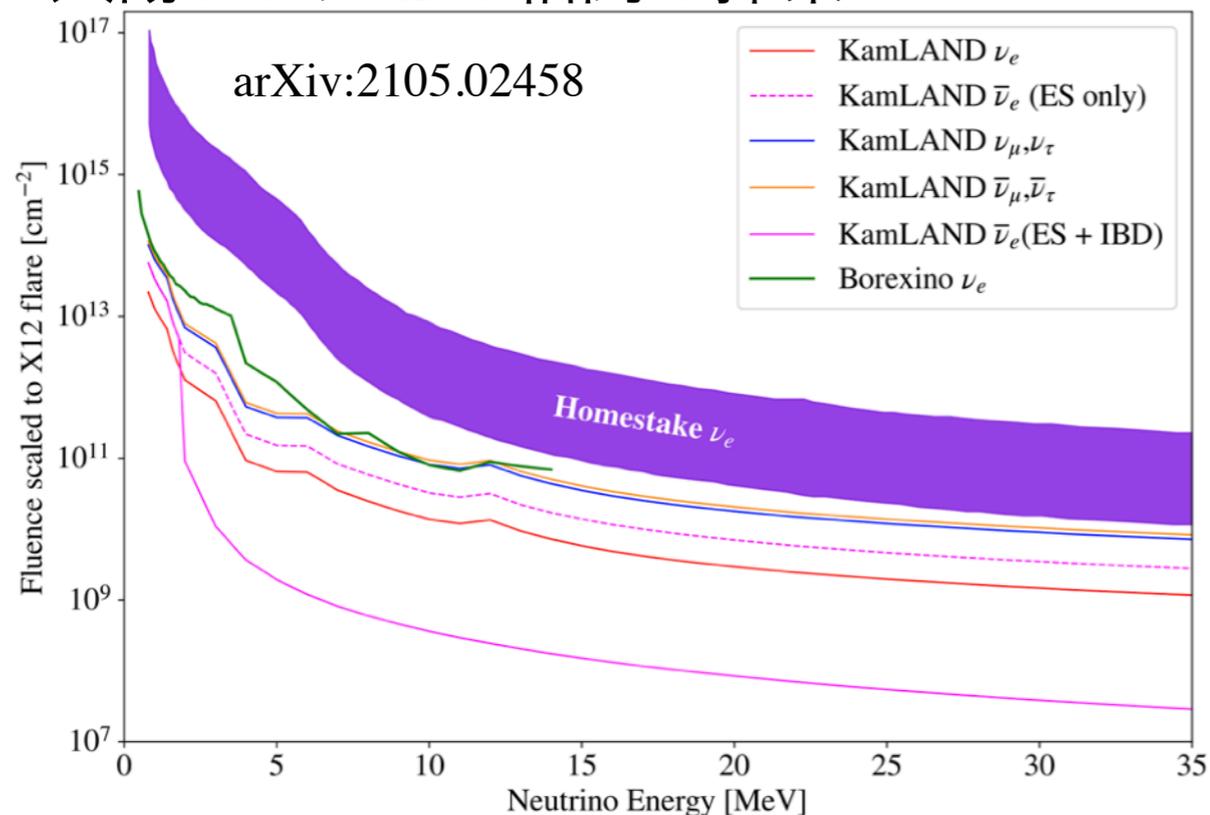
NC $\nu_x + p \rightarrow \nu_x + p \sim 250\text{ev}$

ν_e
 $\sim 2\text{ev}$

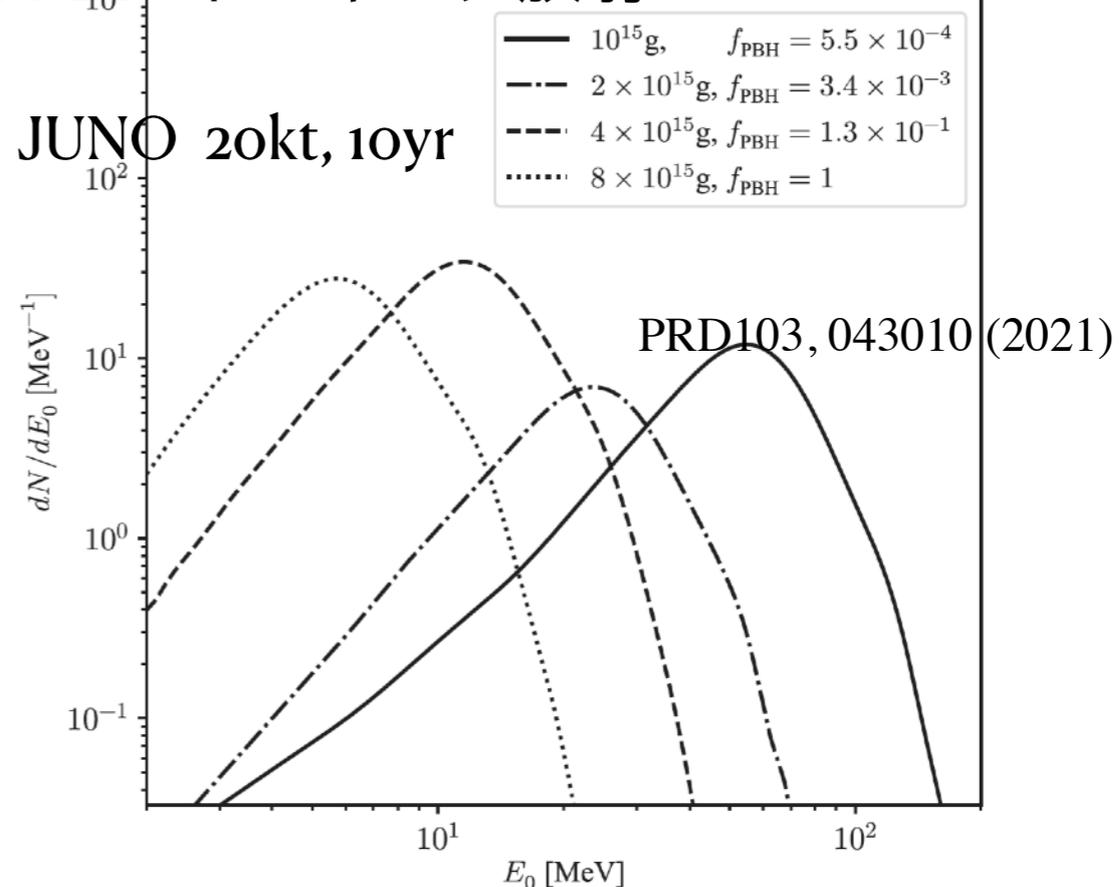
LSならでは

その他

太陽フレアとの関連の探索

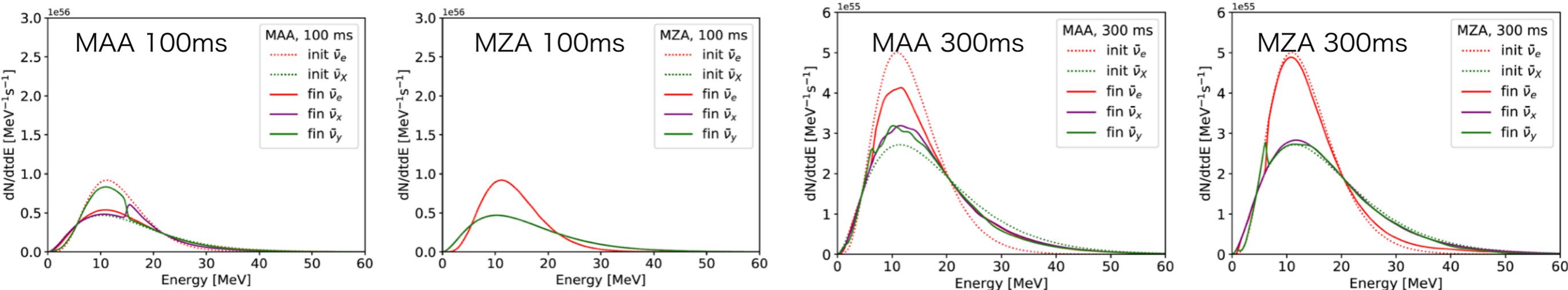


PBH DMホーキング放射



超新星爆発でのニュートリノ集団振動の研究

PRD103, 063008 (2021)



重力波事象との関連の探索 (LIGOとMoU)

Spin Flavour Precession 探索 (天体磁場とニュートリ磁気モーメント)

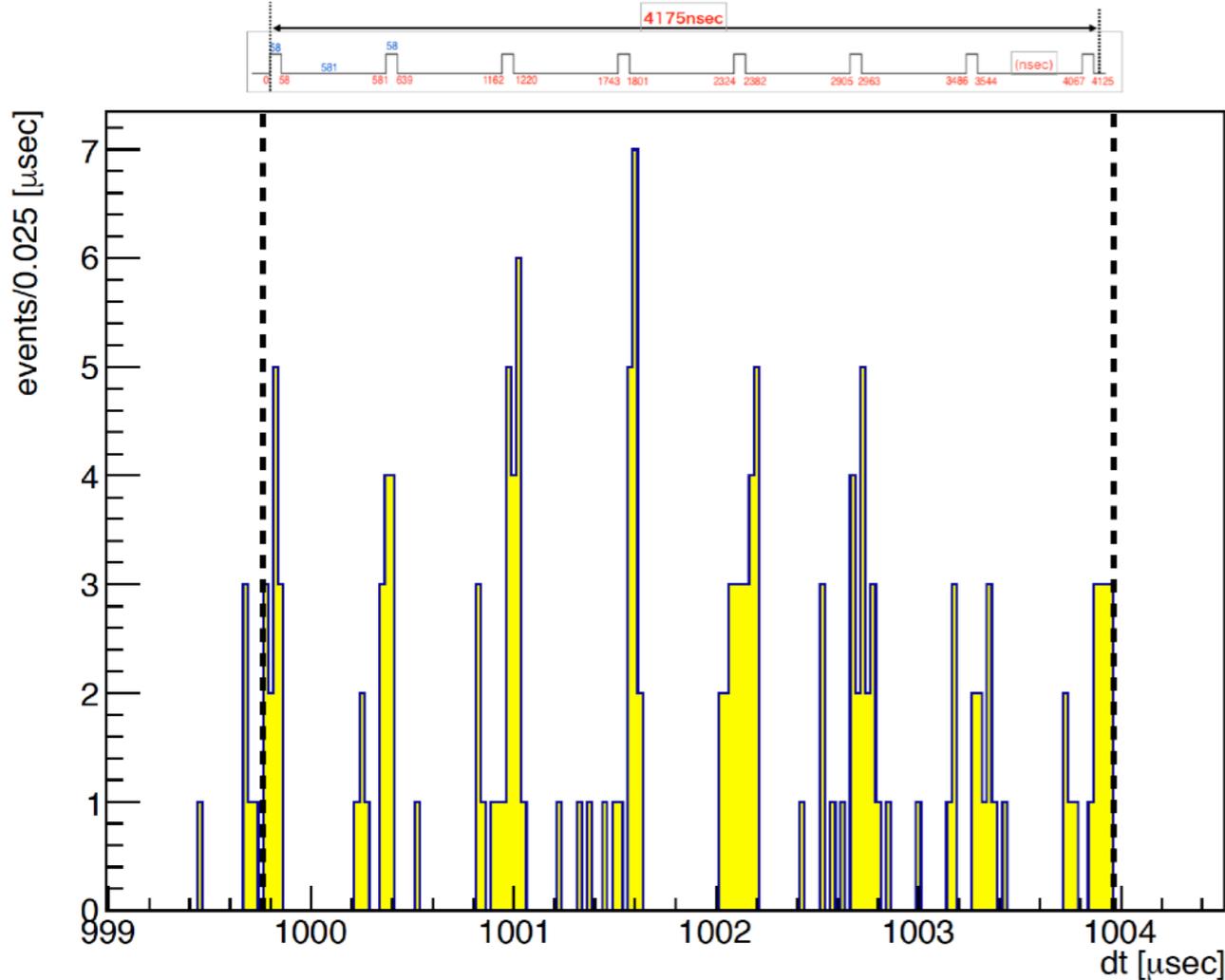
GRBとの関連の探索 など

さらに

● T2KL

T2K-KamLAND間のMoU

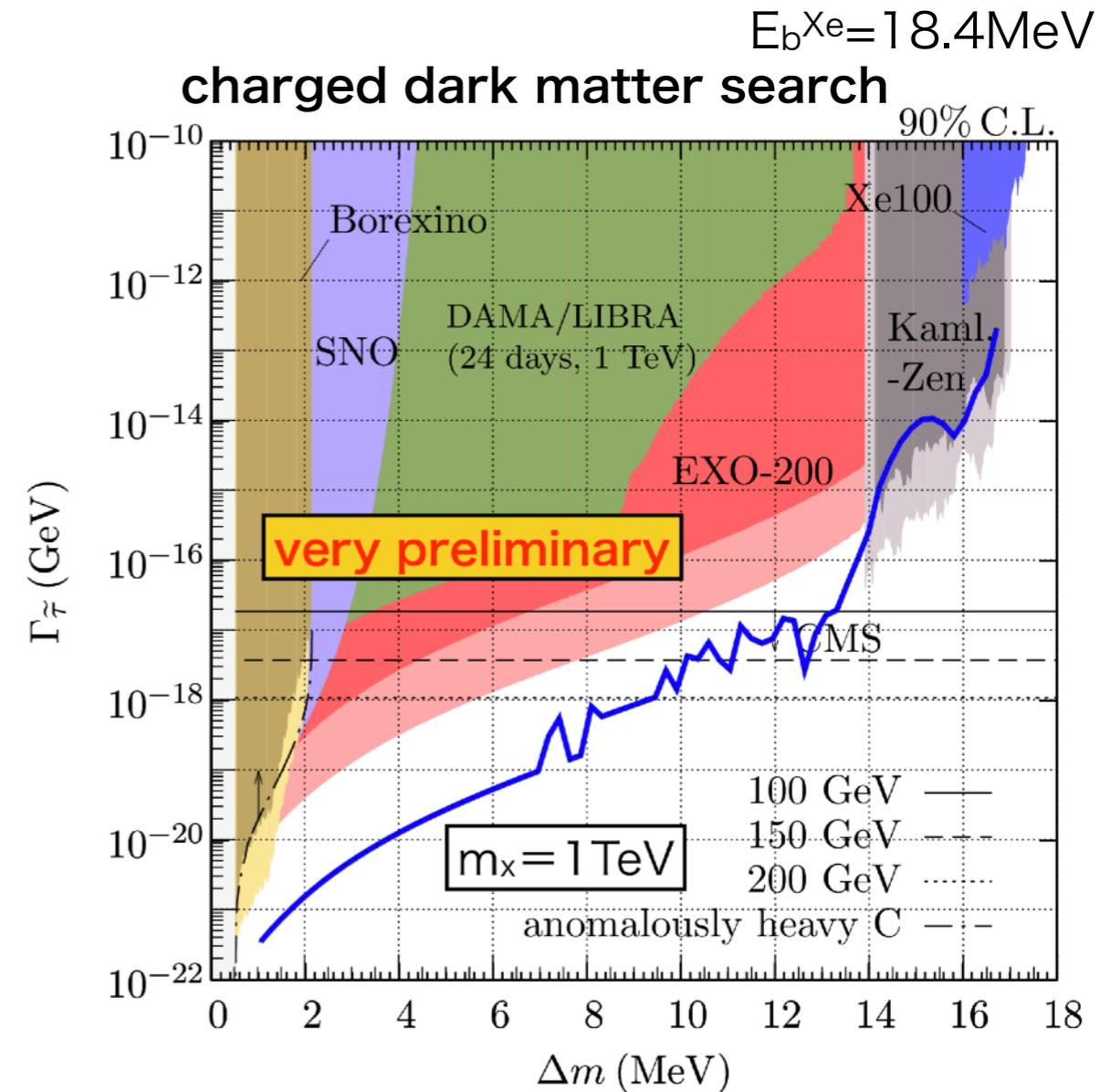
spill structure of J-PARC neutrino
observed at KamLAND



中性粒子や低 β 粒子も観測可能。
中性カレント反応を中心に特徴的な
ニュートリノ反応研究。

● 暗黒物質探索

特定のモデルでは世界最高感度を実現



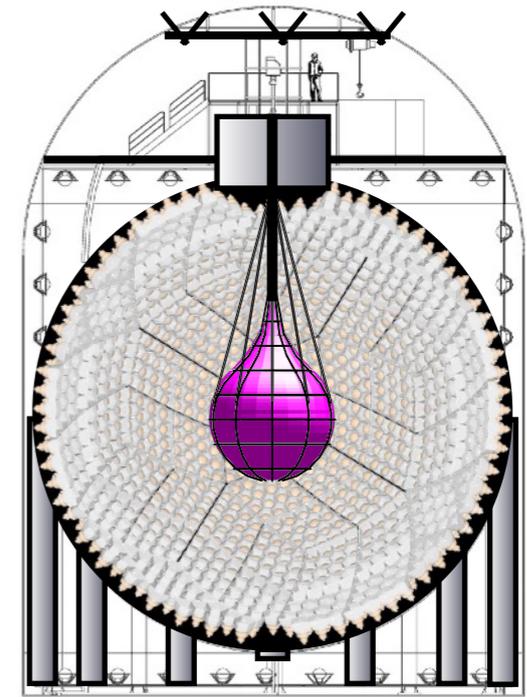
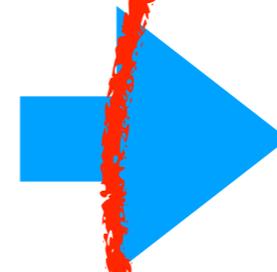
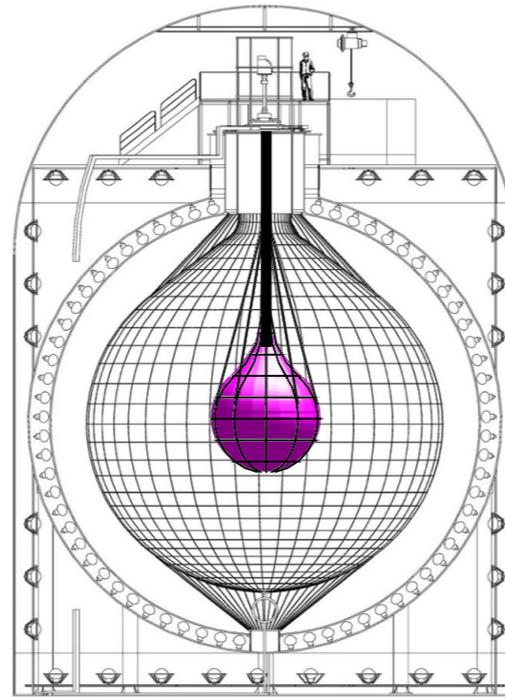
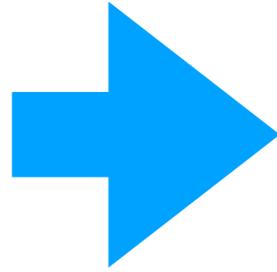
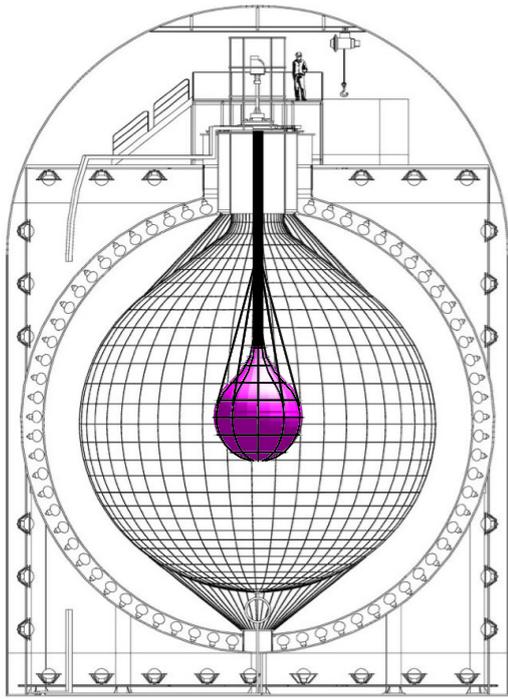
DM対消滅ニュートリノ
DM宇宙線加速
DM $\rightarrow \nu\nu\gamma$ とかも

4. 神岡茂住坑での大型アクティビティ継続

KamLAND-Zen 400

KamLAND-Zen 800

KamLAND2-Zen

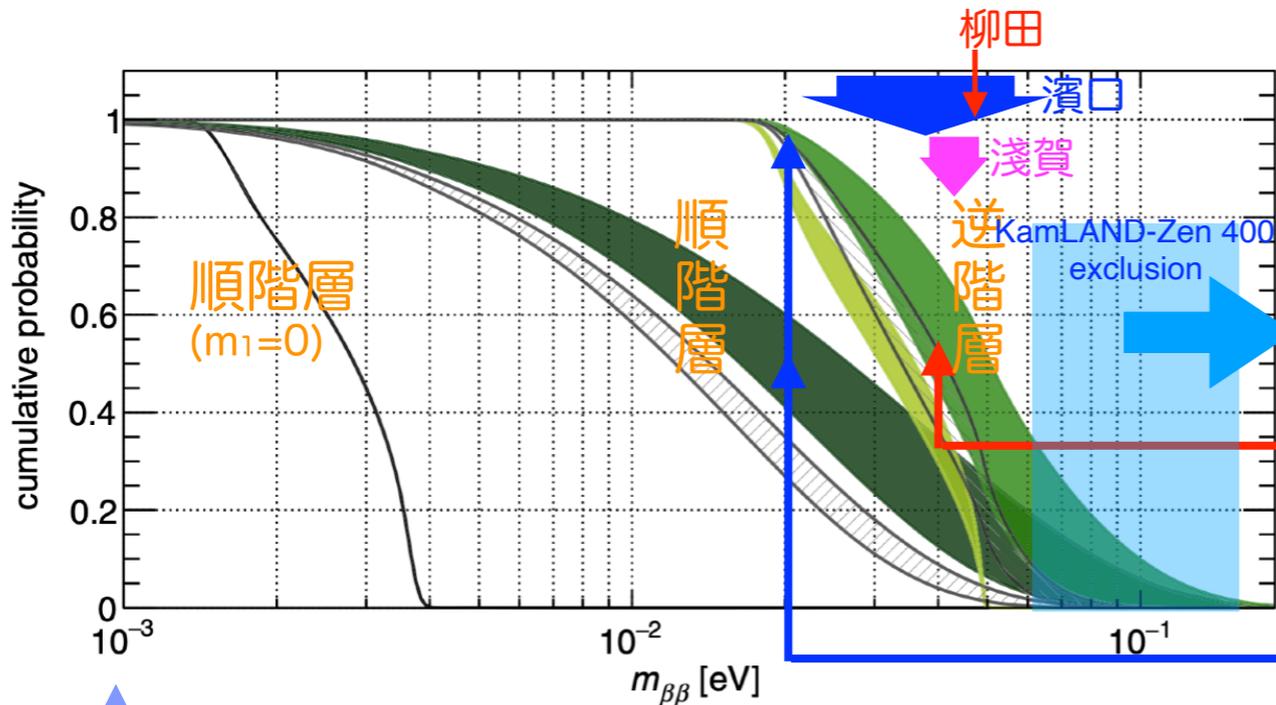


集光ミラー } 5倍増光量
HQE-PMT }
新LS }
蛍光ミニバルーン }

380kgを導入(2011-)
世界トップの性能

現在,745kg を導入(2019-)
目標 40meV

高分解能化 申請計画
目標 20meV



パラメータ空間の探索割合

40meV 逆階層の50%

**20meV 逆階層の95%
さらに順階層の50%**

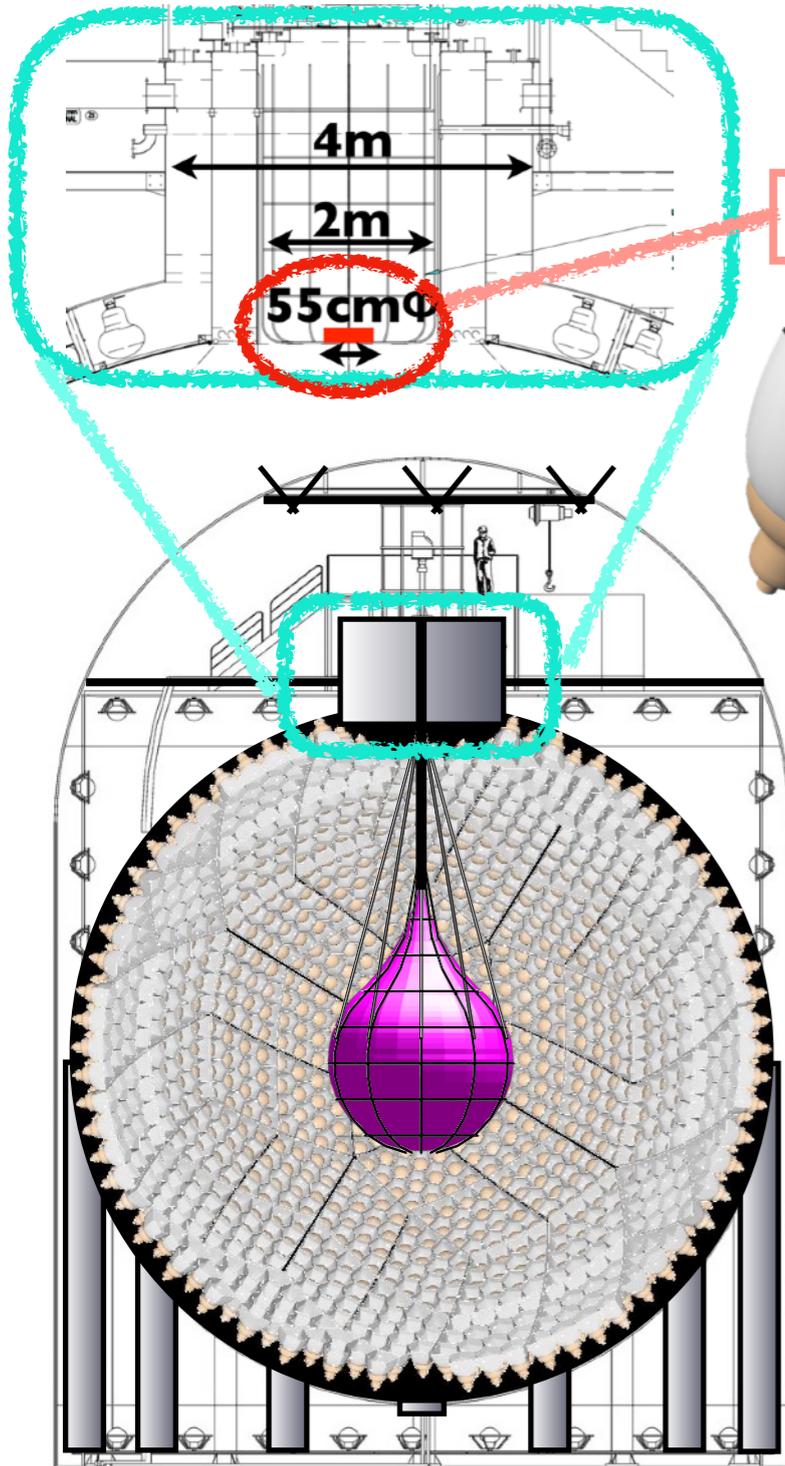
↑ 1meV
ざっくり100トン欲しい

PRD96,053001 (2017)

カムランドの高性能化計画

2νバックグラウンド低減にはエネルギー分解能の改善が必要

⇒ KamLAND2-Zen



導入口拡大



集光ミラー

光収集量 ×1.8

高量子効率PMT 光収集量 ×1.9

17" ϕ \rightarrow 20" ϕ $\epsilon = 22 \rightarrow 30+\%$

新型シンチレータ 光収集量 ×1.4

(高透過率)

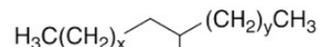
エネルギー分解能 σ (2.6MeV) = 4% \rightarrow ~2%

目標感度 20 meV

20meV 逆階層の95%
順階層の50%



LAB (Linear Alkylbenzene)



1000+ kg xenon

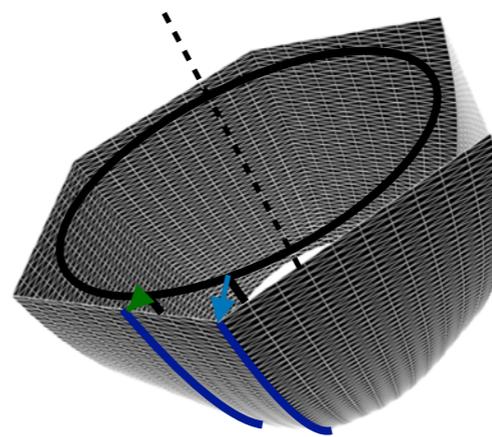
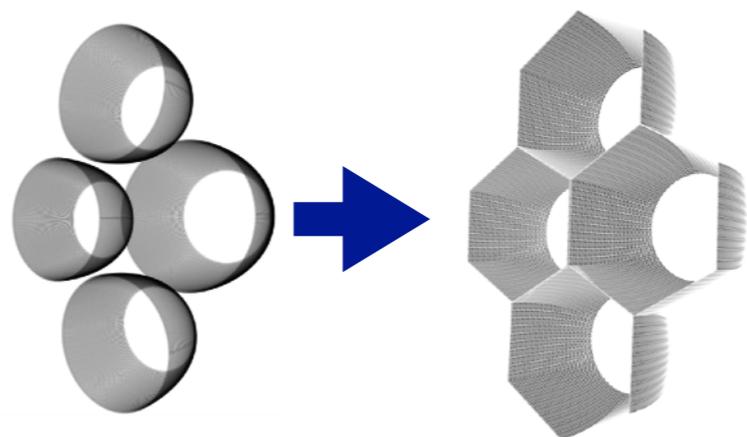
($>4 \times 10^{27}$ ^{136}Xe , 7 ev/5yr @ $T_{1/2} = 2 \times 10^{27}$ yr)

KamLAND2-Zenに向けた準備

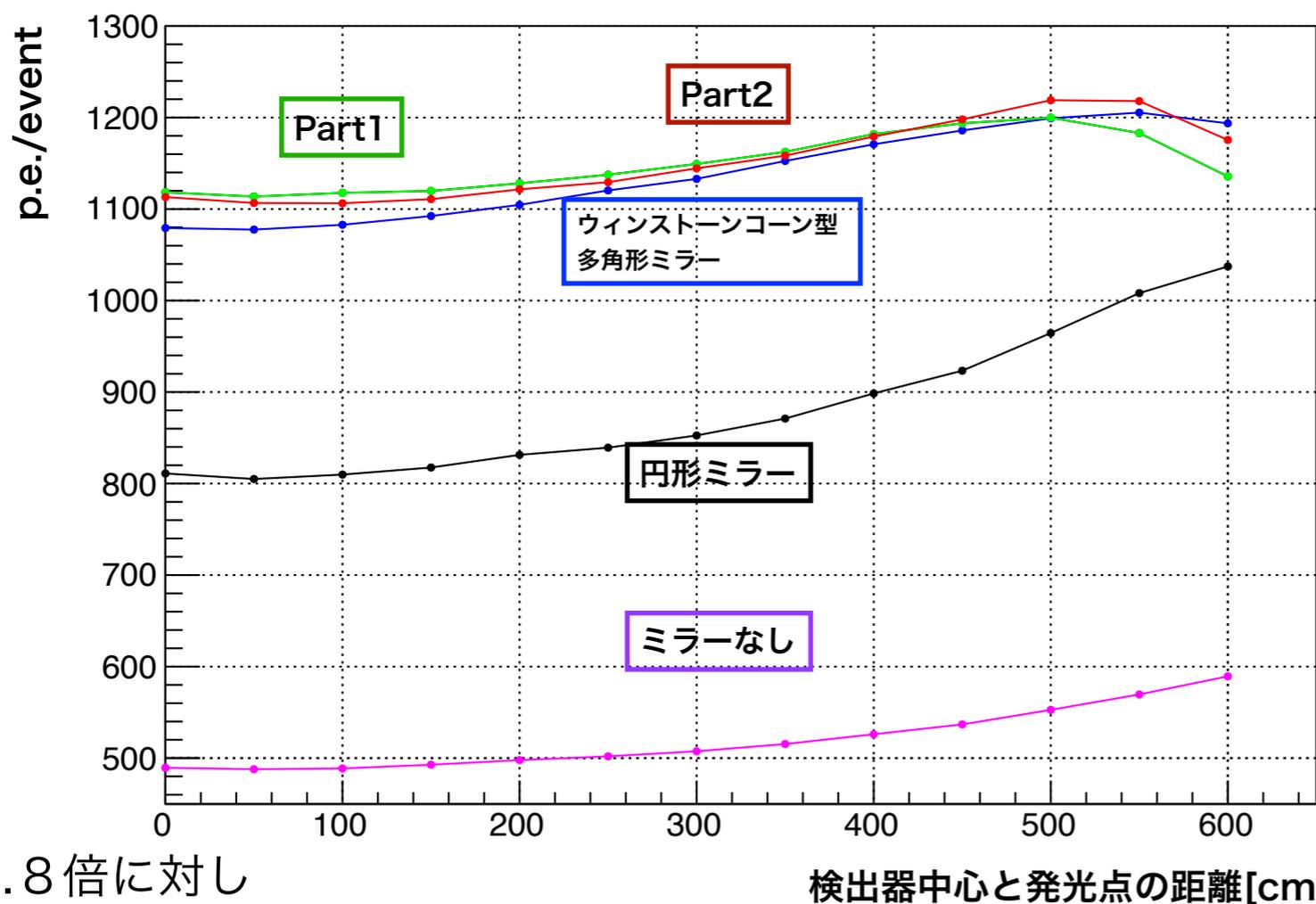
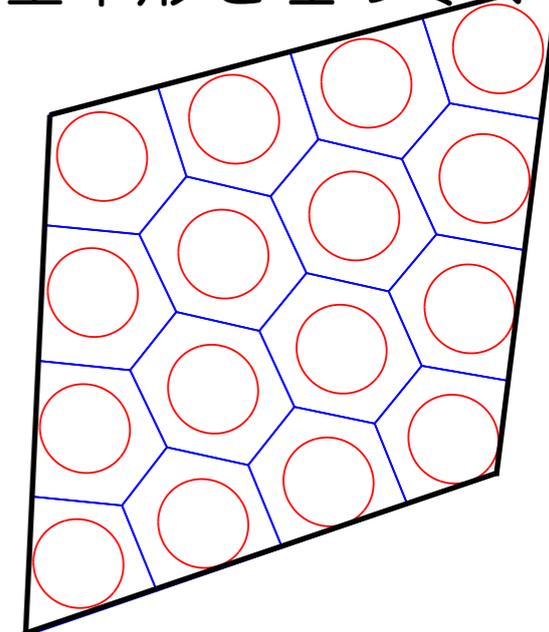
○ 集光ミラー



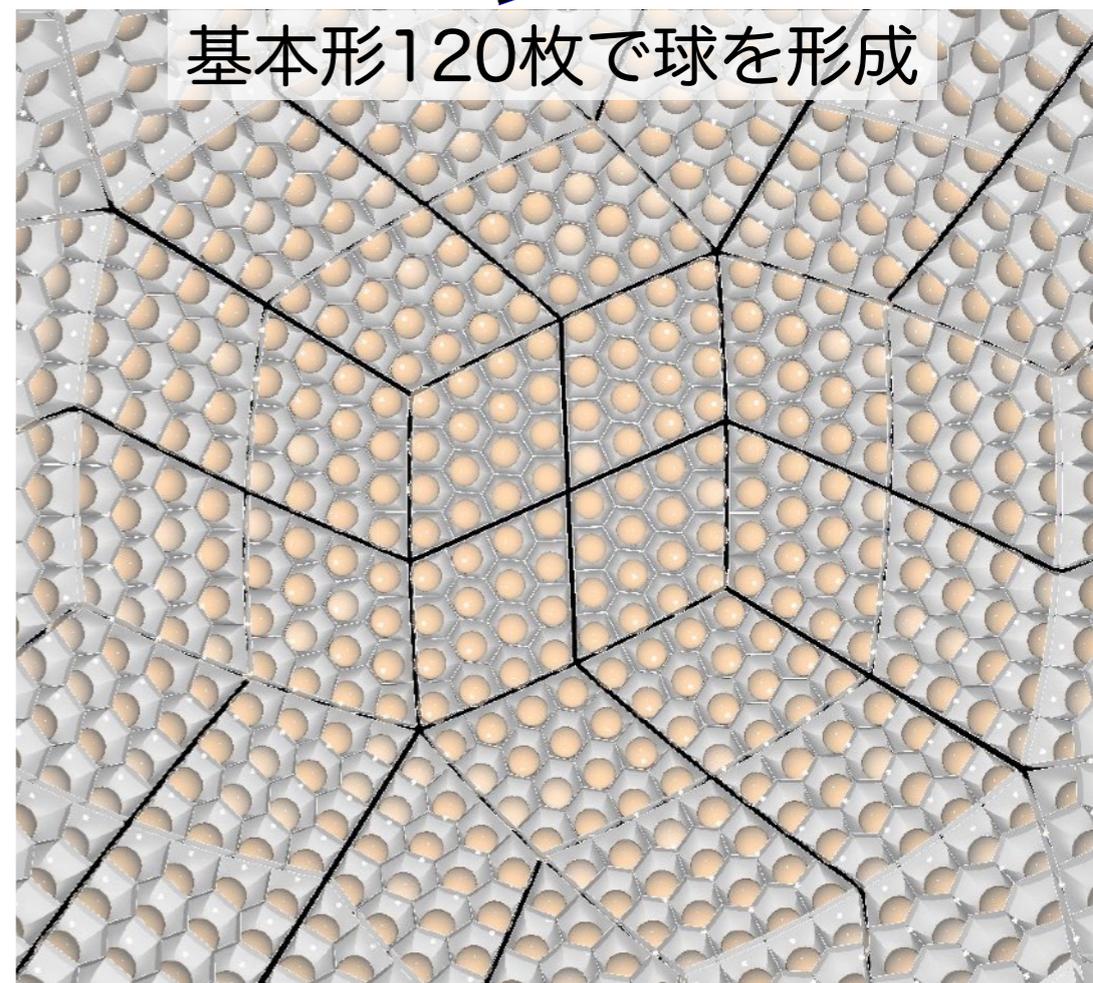
円形ミラーでは隙間ができるので、
多角形で最適化



基本形を埋め尽くし



基本形120枚で球を形成



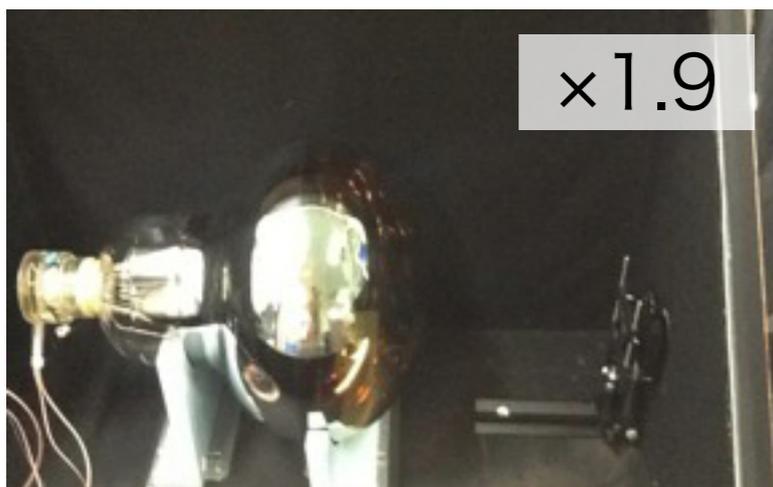
目標1.8倍に対し

ミラーなしと比べて2.2~2.3倍の集光量

今年度テストタンクを建設して
実機テストの予定

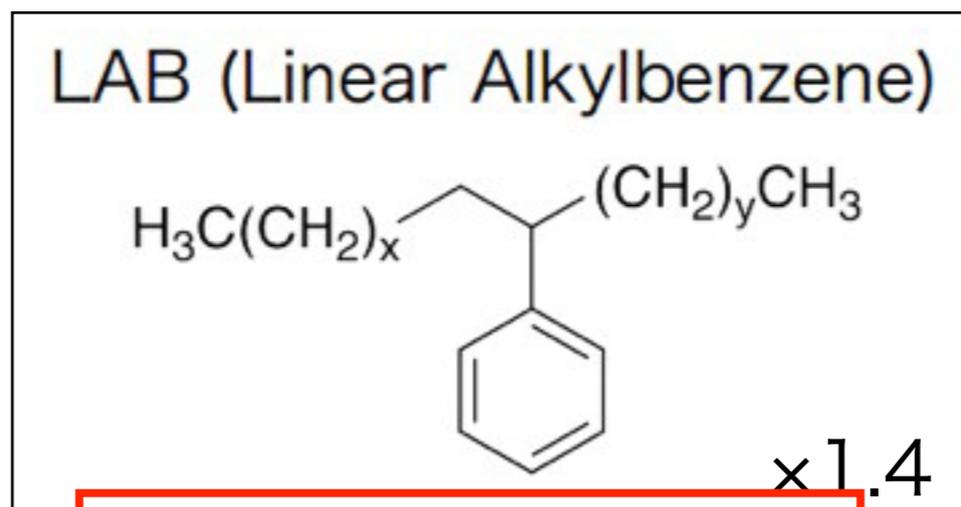
KamLAND2-Zenに向けた準備 つづき

○ 光量子効率PMT



プロトタイプ性能検証済み

○ 新型シンチレータ



活性炭での高透過率化成功

○ 新型電子回路

原子核破碎BG低減

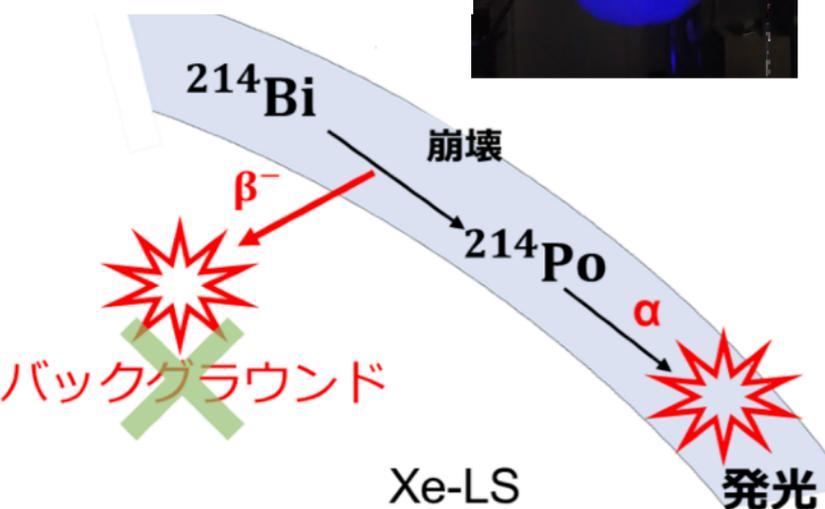
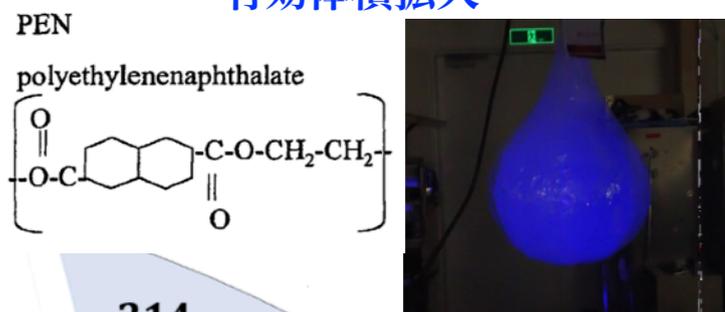


16ch×1GS/s×12bit

プロトタイプ性能検証済み

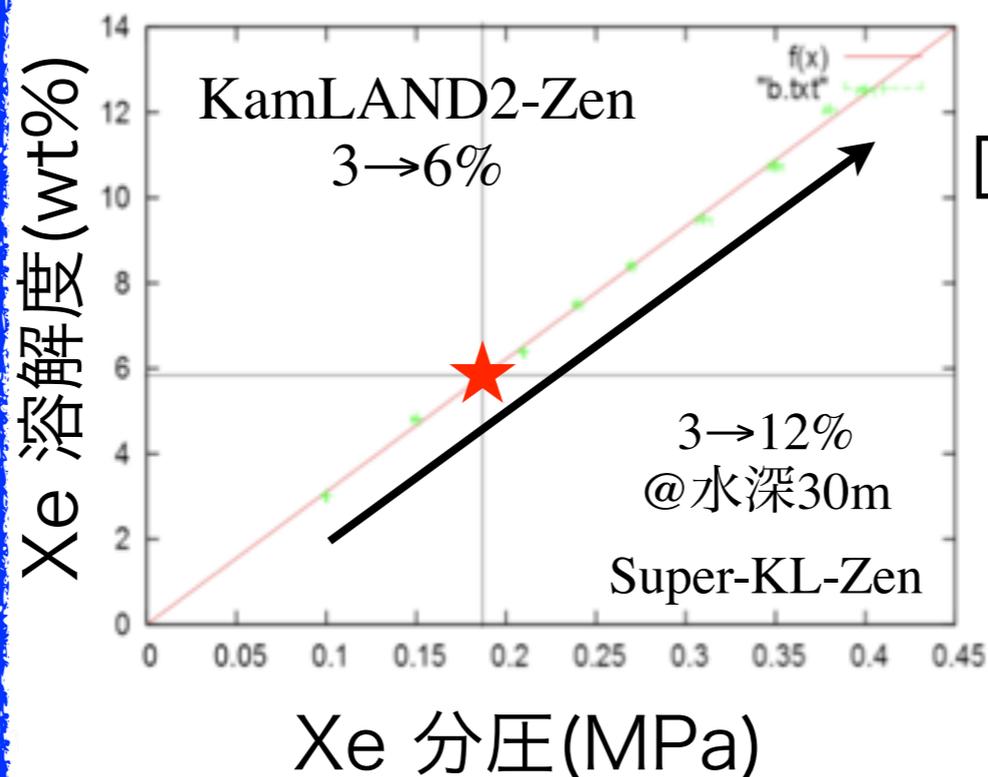
○ 蛍光フィルム

有効体積拡大



プロトタイプ完成

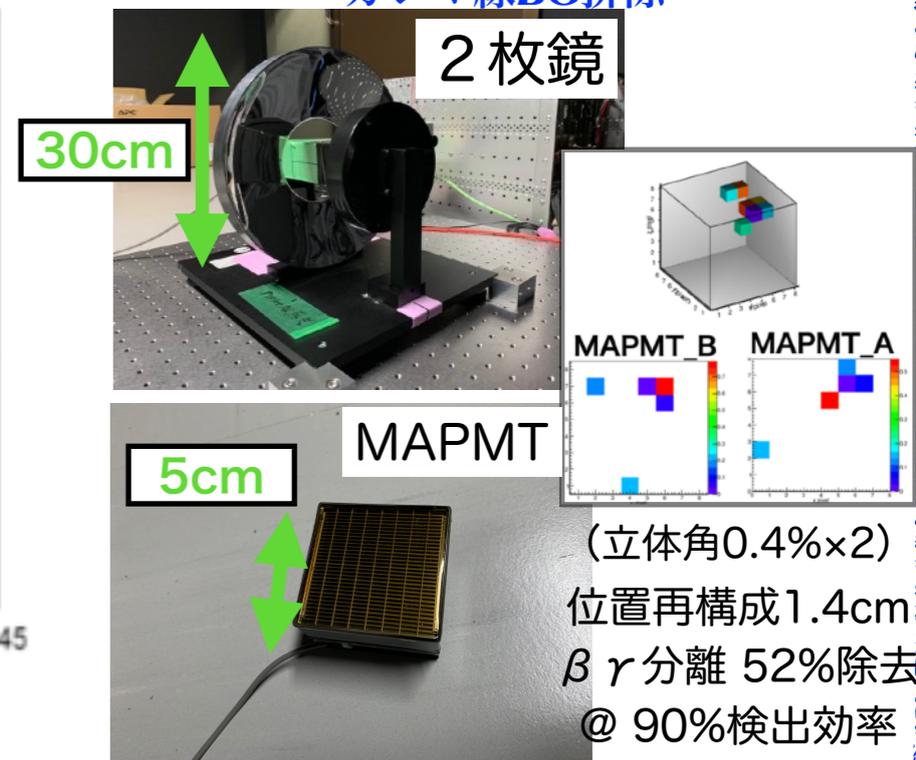
○ キセノン高濃度化



原理検証完了

○ 高感度ステレオ撮像

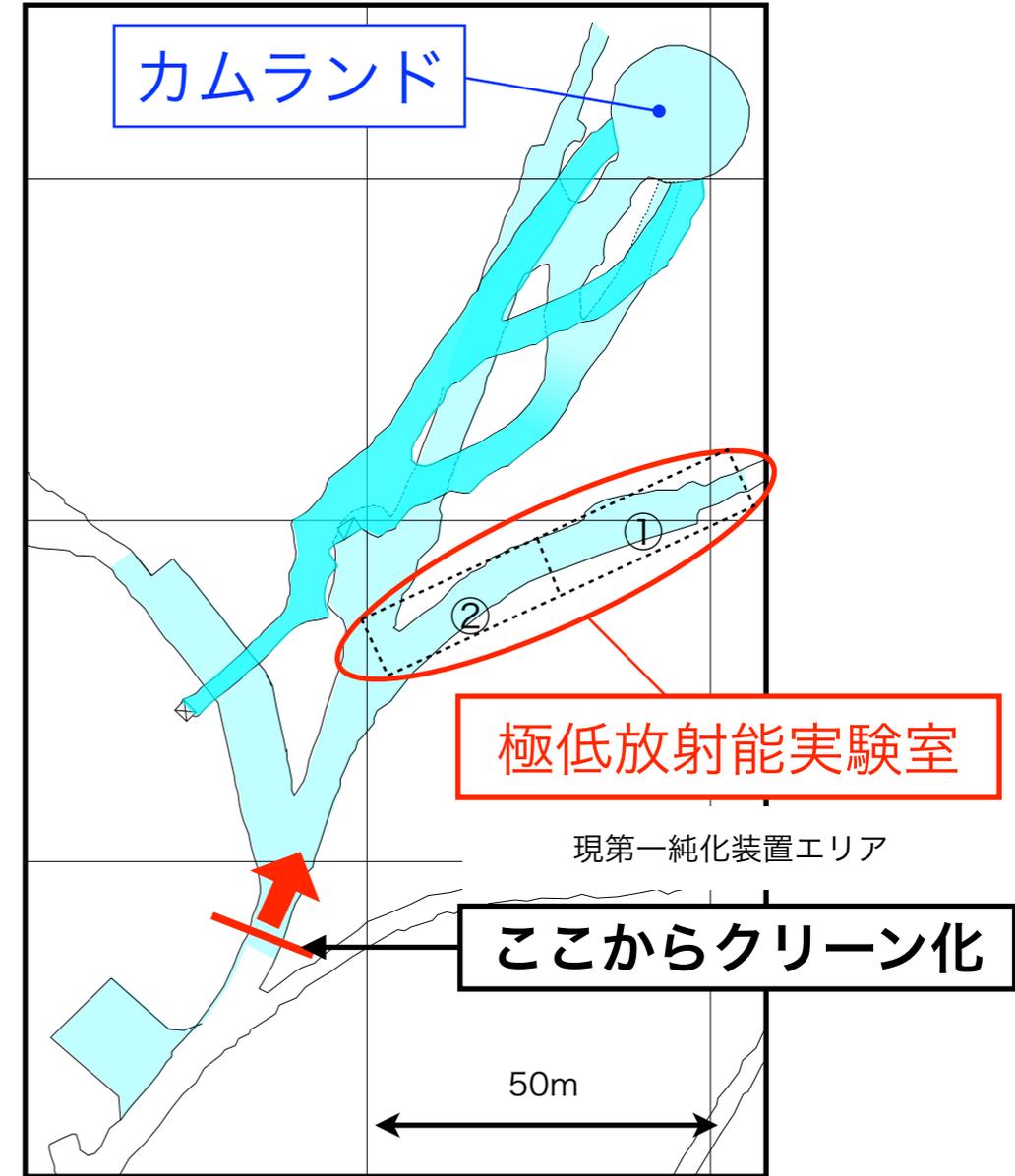
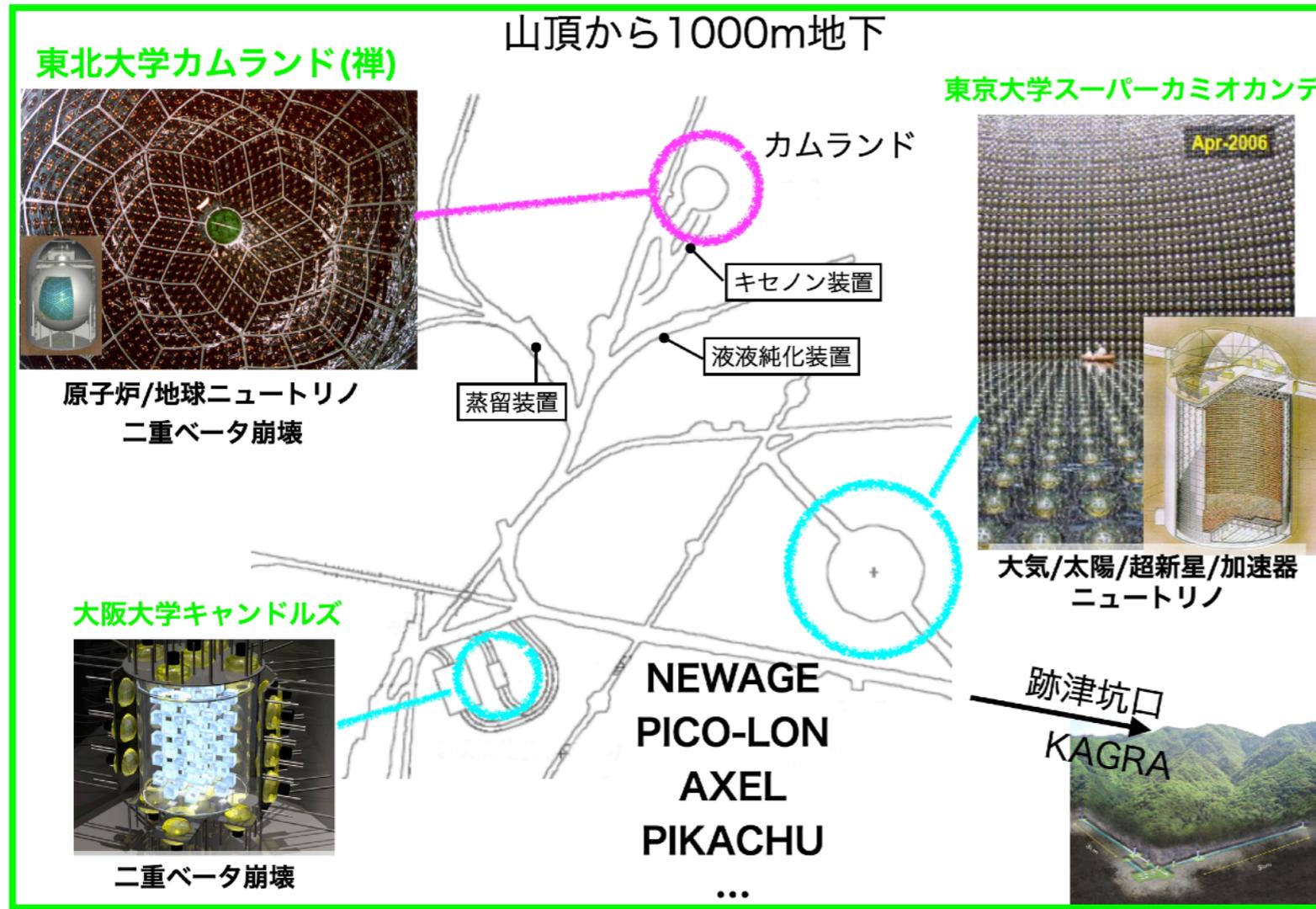
ガンマ線BG排除



原理検証成功

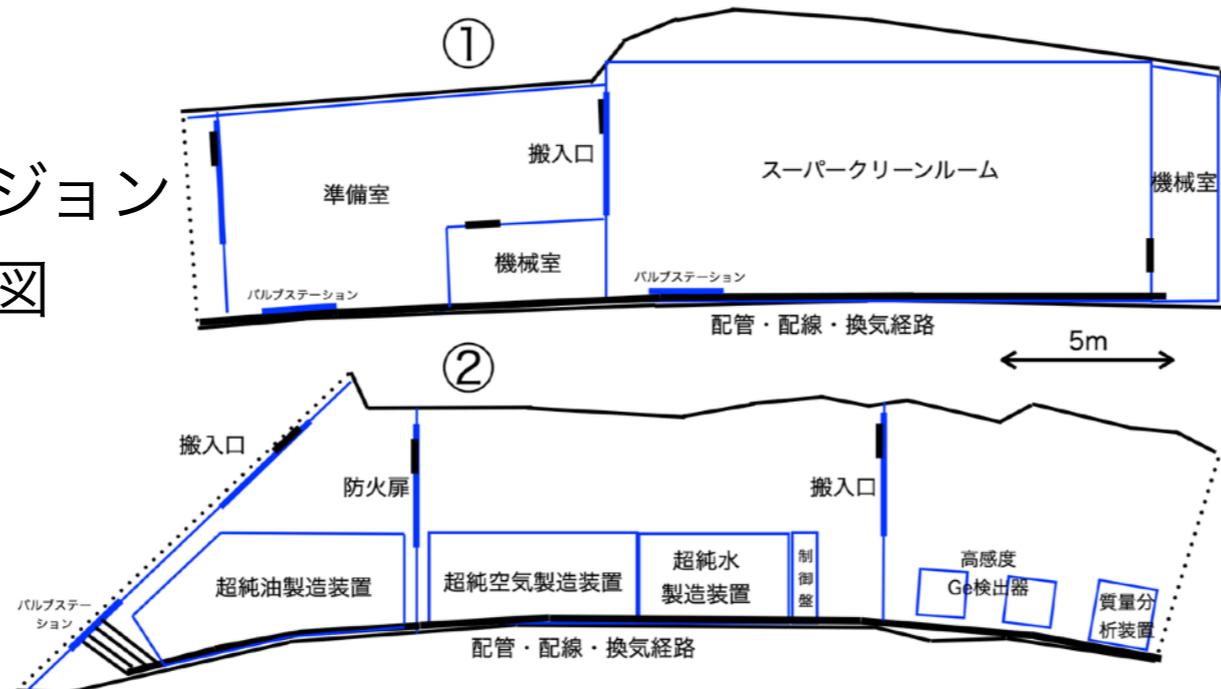
オプション

極低放射能研究の中核、極低放射能設備の**共同利用**



ハイパーカミオカンデ稼働後はカムランドが茂住坑の最大実験

最狭バージョン
整備概念図



極低放射能設備は共同利用
を通して分野の発展に貢献

コミュニティとの関係

CRC、高エネルギー物理学研究者会議を軸に、地球科学、宇宙・天文コミュニティに参加しつつ、新たに地下素粒子原子核研究コミュニティも設立。 lowbg.org 立上げ

→ 「最重要課題として速やかな実現を望む新規計画」

CRC 将来計画検討小委員会 2011-12年度最終報告 最優先の計画 (2018再確認)

天文学・宇宙物理学中規模計画の展望(2013)に掲載

CRC 将来計画検討小委員会 2013-14年度報告書 ロードマップに掲載

高エネルギー物理学将来計画検討委員会答申(2012, 2017)に掲載

日本学術会議 マスタープラン2014, 2017, 2020に掲載

これまでの推薦の流れ

CRC ⇒ 天文・宇宙分科会 ⇒ 素粒子・原子核分科会

⇒ 高エネルギー委員会

前回は、

日本学術会議公開シンポジウム (2019/2/19)

「素粒子物理・原子核物理分野の大型施設計画・大規模研究計画マスタープラン」での発表の機会を得たが、「非加速器素粒子原子核実験のレビュー」だった。

さらに、天文・宇宙から素粒子への推薦を受けて

高エネルギー委員会での「KamLAND2」の発表 (2019/3/16) も実現した。

中型だったためか、分科会でのヒアリングはなかった。

コミュニティとの関係つづき

新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」(2014-2018)で
中心となって分野形成、H26開始の20拠点の中間評価では唯一A+の最高評価を取得
新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」(2019-2023)でも中核
lowbg.org
地下宇宙素粒子研究・極低放射能研究コミュニティ

東京大学地震研究所と「素粒子地球物理の推進」において部局間協定 地球科学
大阪大学核物理研究センターと「地下での原子核研究の推進」において部局間協定 原子核
人材交流：ニュートリノポスドク→核物理准教授

ハイパーカミオカンデの設置場所は、現在活発な茂住坑とは異なるが、カムランド2は、
ハイパーカミオカンデ開始後も、多様な研究が進行中の茂住坑の維持・活性化に貢献する。
茂住地下施設での大型アクティビティの継続

● 5分野！！合同セッション@物理学会

📅 16日 K209会場 16pK209 13:30~17:15

実験核物理領域, 素粒子論領域, 素粒子実験領域, 理論核物理領域, 宇宙線・宇宙物理領域合同

二重ベータ崩壊

📅 14日 K203会場 14pK203 13:30~16:45

実験核物理領域, 素粒子論領域, 素粒子実験領域, 理論核物理領域, 宇宙線・宇宙物理領域合同

暗黒物質探査 (I) 合同

● 地球ニュートリノは日本地球惑星科学連合、物理学会

● 超新星ニュートリノは天文学会、物理学会

まとめ

「極低放射能環境でのニュートリノ実験」 (略称：カムランド2)

1. 逆階層構造をカバーするニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索
2. ニュートリノ地球物理の推進
3. マルチメッセンジャー天文学の低エネルギーニュートリノ

(低E ν : KamLAND2, 中E ν : Hyper-K, 高E ν : IceCUBE)

4. 茂住地下施設での大型アクティビティの継続

経費

準備期間 -2024

濃縮キセノン調達(200kg)	4億円
HQE-PMT調達	5億円
高性能電子回路導入	3億円
クリーンルーム整備	3億円
純空気製造装置導入	1億円
純化装置高度化	5億円
集光ミラー製作	1億円
バルーン製作	1億円

建設期間 2025-2026

導入部拡張工事	↓
PMT交換・集光ミラー設置	1億円
バルーン導入	
HQE-PMT調達	5億円
高光収率液体シンチレータ製造	11億円
注液	

設備合計40億円 (内国外4億円)

観測期間 2027-2036

ニュートリノ地球科学の推進
ニュートリノのマヨラナ性検証
低エネルギーニュートリノ天文学

運転経費 (2027-2036)
3.8億円/年
(うち自己資金3億円/年、
国外0.3億円/年)

総額78億円 (要求額41億円)

これまでマスタープラン2014, 2017, 2020 に中型のルートで掲載され、大学の強いサポートも得たが概算要求は採択されず。⇒文科省ロードマップへの掲載を目指す

日本学術会議マスタープラン2023 へ大型としてLOI提出 天文・宇宙分科会

ご支援よろしく申し上げます。