

地下における 素粒子実験の展望

東北大学ニュートリノ科学研究センター
井上邦雄

10年先を俯瞰した高エネルギー物理学の将来展望
日本物理学会2011年秋季大会 2011年9月17日 弘前大学

はじめに

- 地下素粒子実験でも活発なコミュニティが形成されつつあり、新発見が期待される観測がある。
- ここでは、暗黒物質探索・ニュートリノレス二重 β 崩壊探索に話を絞る。
- 次世代の観測装置が次々と稼働を始めており、ひとつの実験に集約するよりは、個性に富んだ複数の手法が共存し、研究進展に機敏に対応できる方が効率的と思われる。
- 多様性のもと、大学の独自性や得意な技術を発揮すれば、学生にもアピールしやすい。

現在の宇宙の構成要素

物質
4.6%

星
バリオン
ニュートリノ？
0.1~1%

宇宙・素粒子の大きな謎

暗黒物質

暗黒エネルギー

インフレーション

宇宙物質優勢

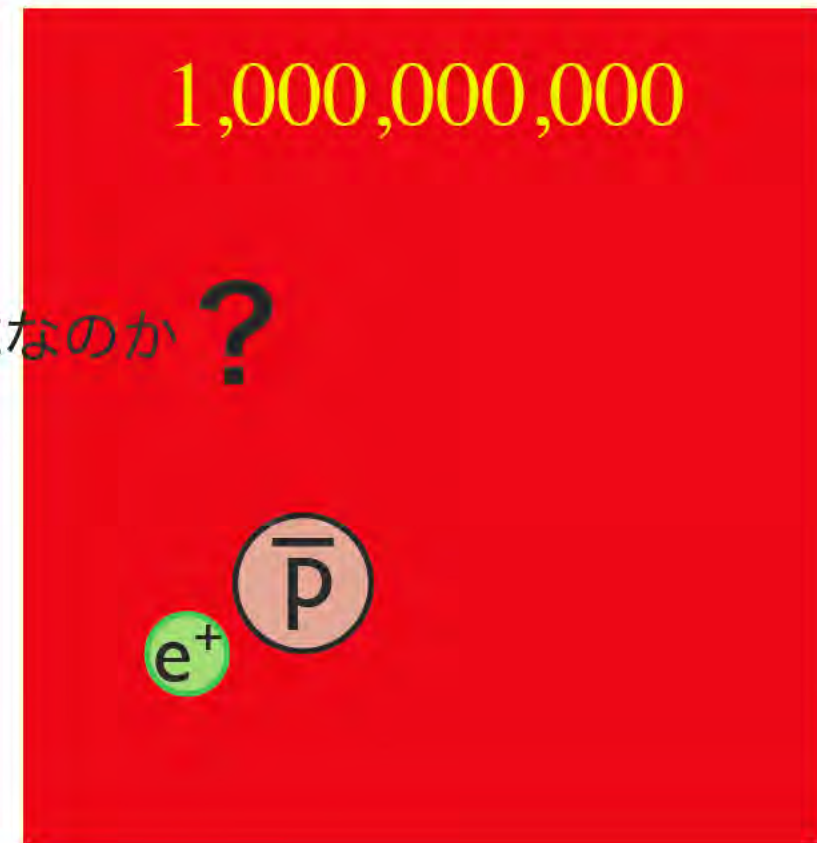
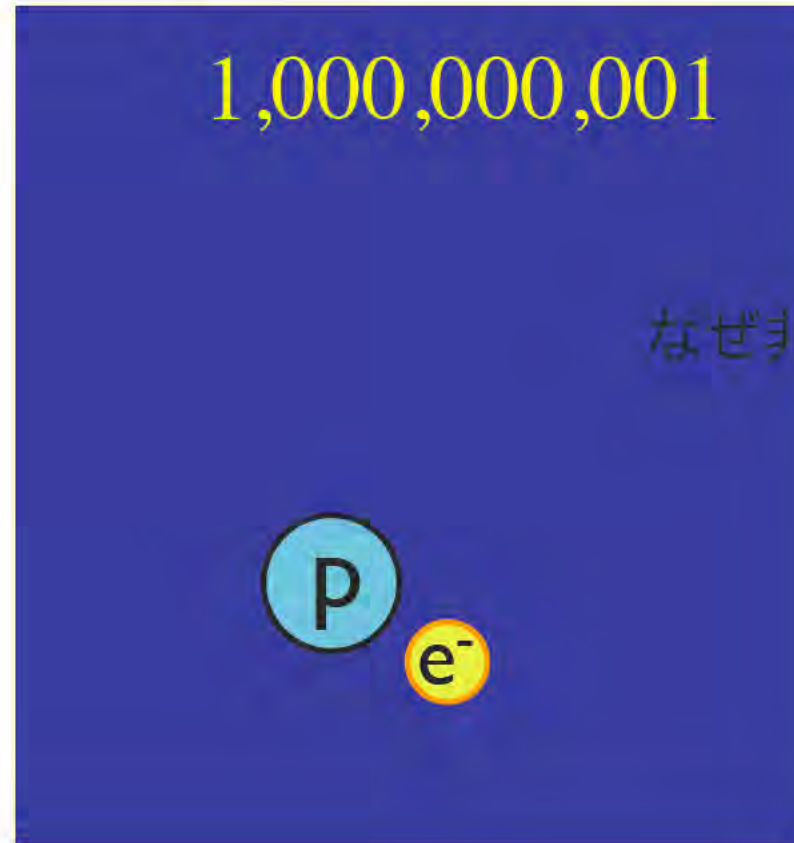
小さなニュートリノ質量

暗黒エネルギー
72%



宇宙物質優勢の謎

宇宙開闢



なぜ非対称なのか？

粒子

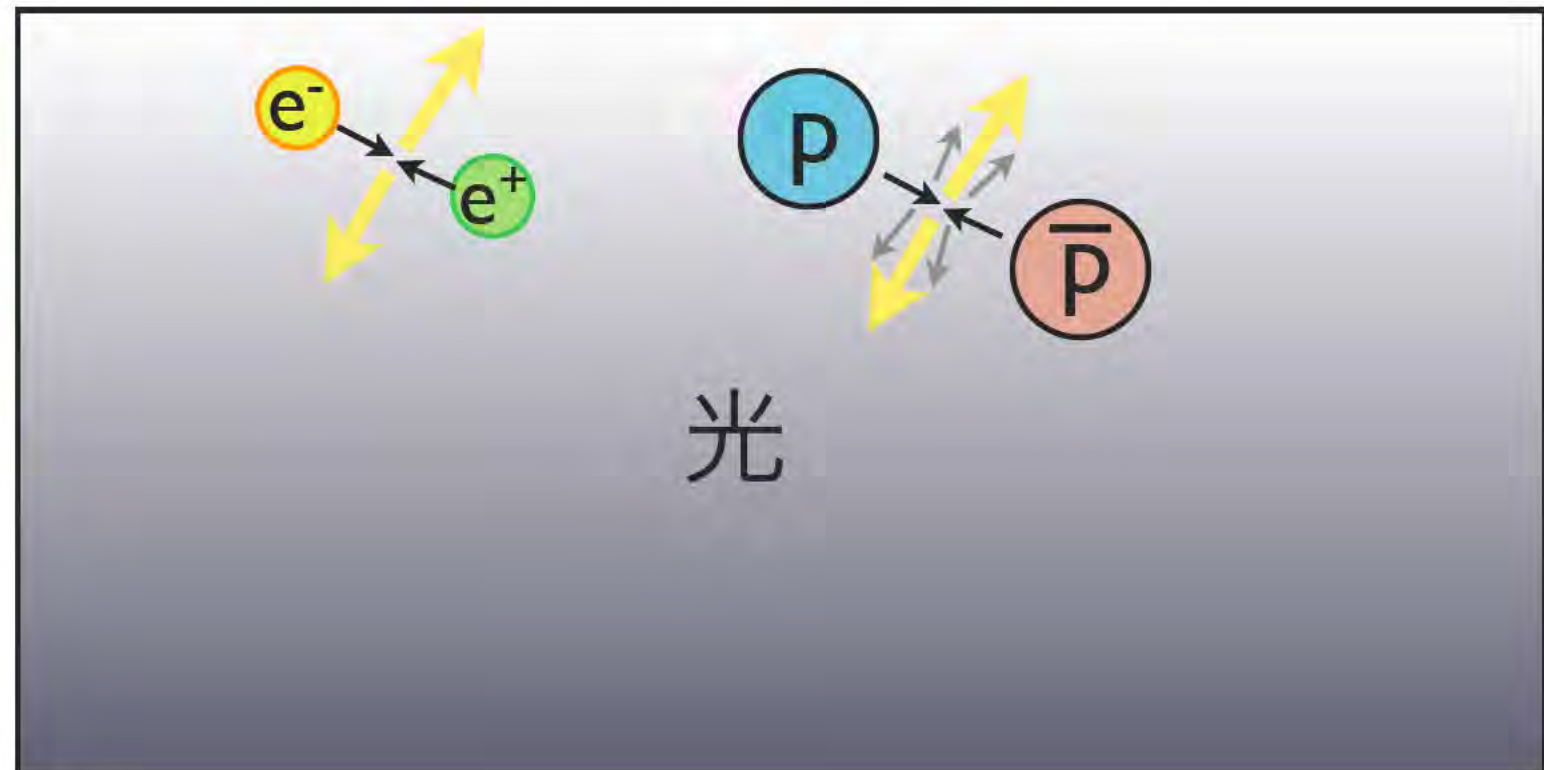
反粒子

現在



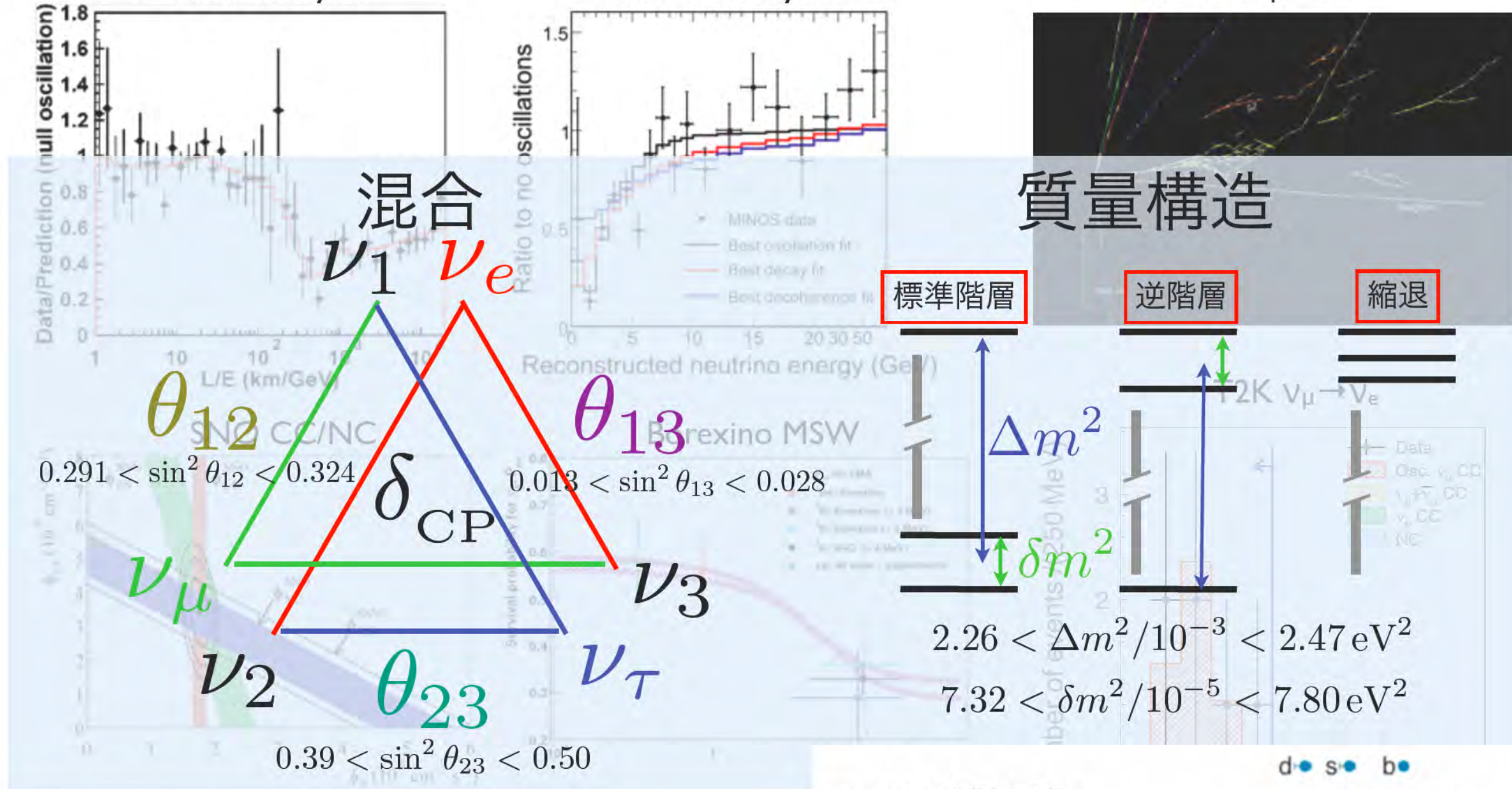
物質

なぜ我々物質は生き
残れたのだろうか？



SK atm 1/2 cycle

MINOS 1/2 cycle

OPERA $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 

Dark Matter

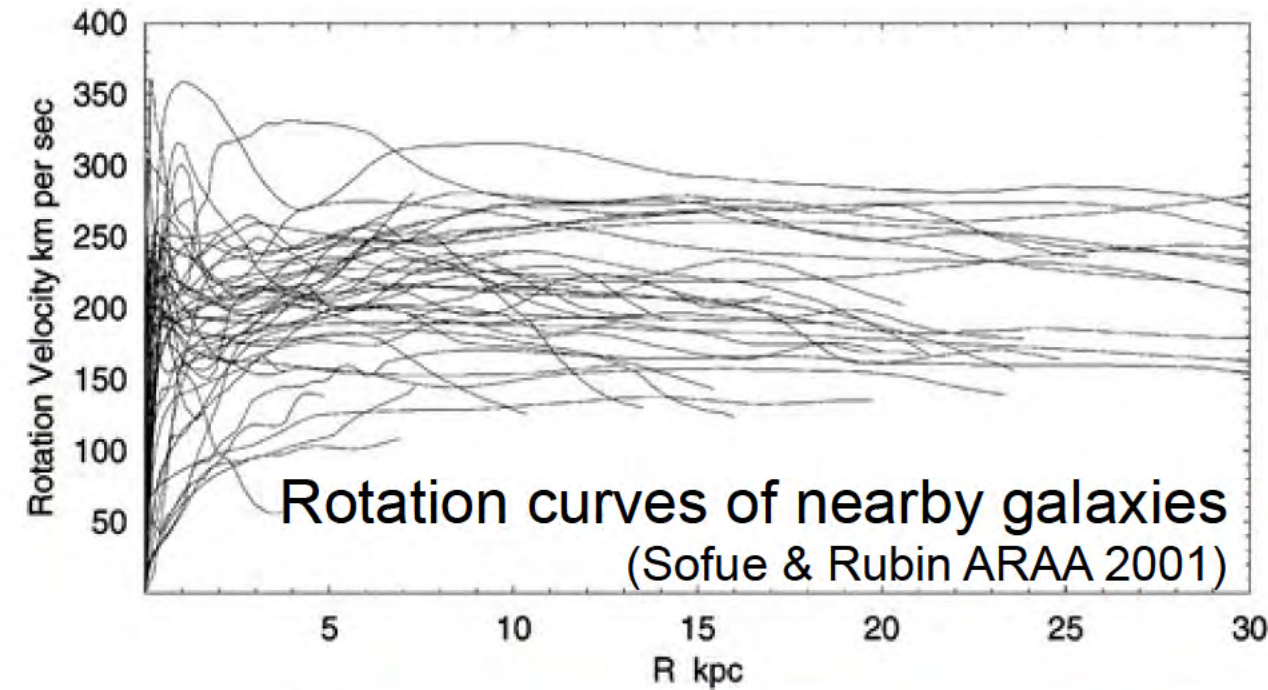
Evidence for Dark Matter at Different Astrophysics Scales

Spiral Galaxies

Scale: $\sim 10^{21}$ m

Rotation curves remain flat far beyond the edge of the visible disk.

$$\left. \begin{array}{l} v(R) = \sqrt{GM(R)/R} \\ v(R) \approx \text{const} \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} M(R) \propto R \\ \rho(R) \propto R^{-2} \end{array} \right.$$



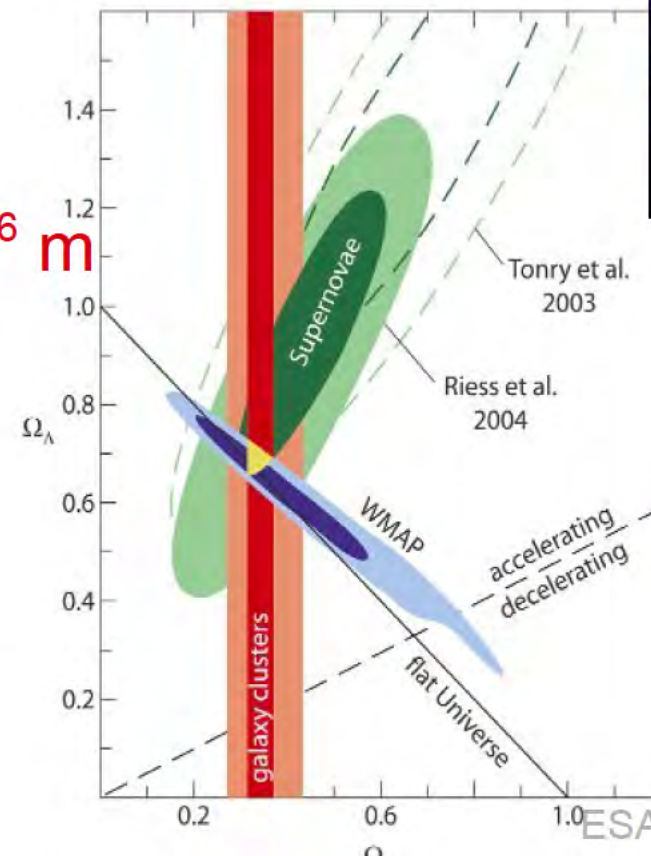
Galaxy Clusters

Scale: $\sim 10^{22}$ m

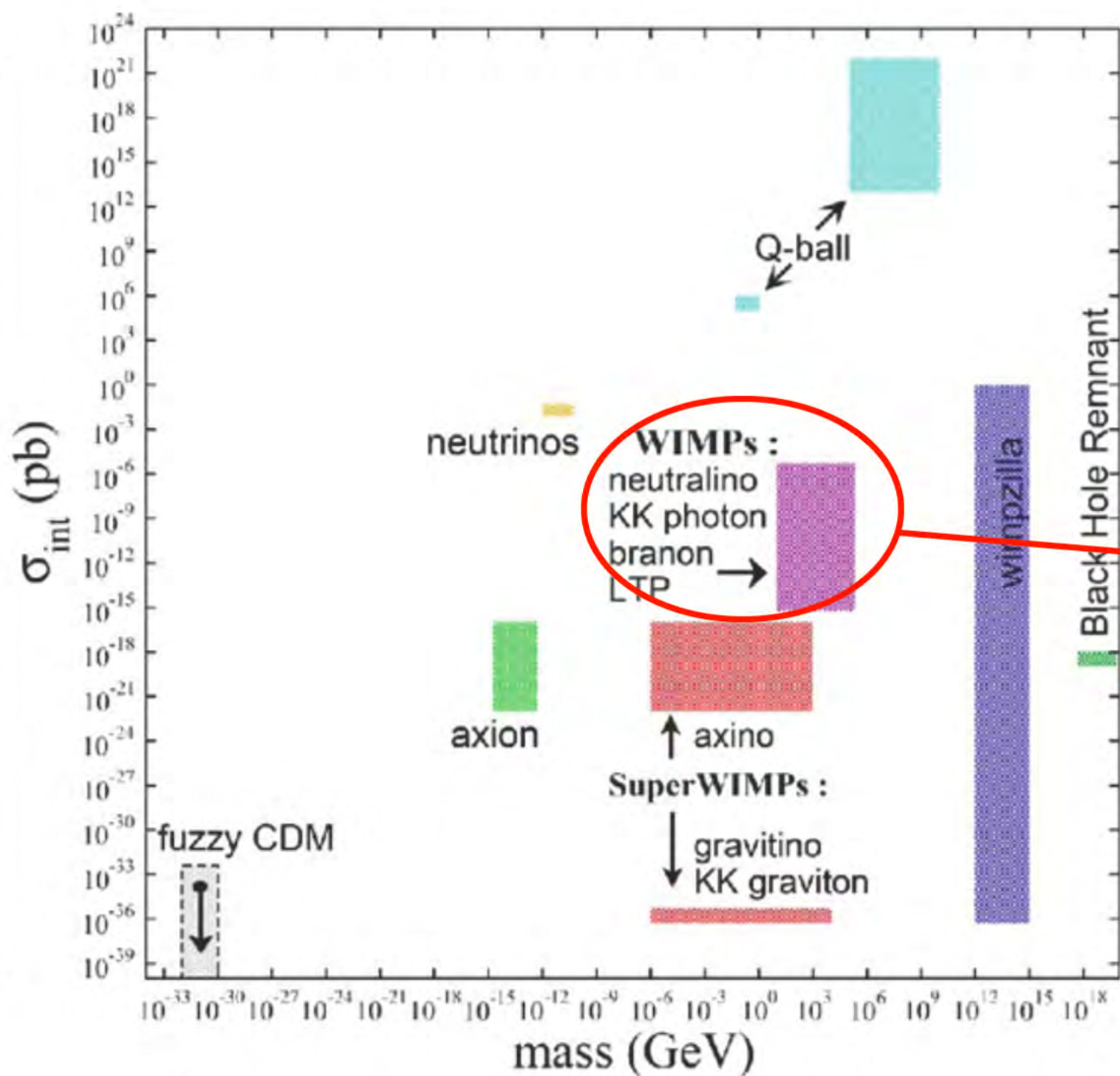
- Orbital velocities of galaxies (Zwicky's discovery in 1933)
- X-ray gas
- Gravitational lensing

The Dark Universe - Scale: $\sim 10^{26}$ m

- CMB: $\Omega_{\text{tot}} = 1.0$
- CMB, BBN: $\Omega_b = 0.045$
- Galaxy clusters: $\Omega_m = 0.27$
- Supernovae Ia: $\Omega_m - \Omega_\Lambda$
- Structure formation: cold DM



>60桁



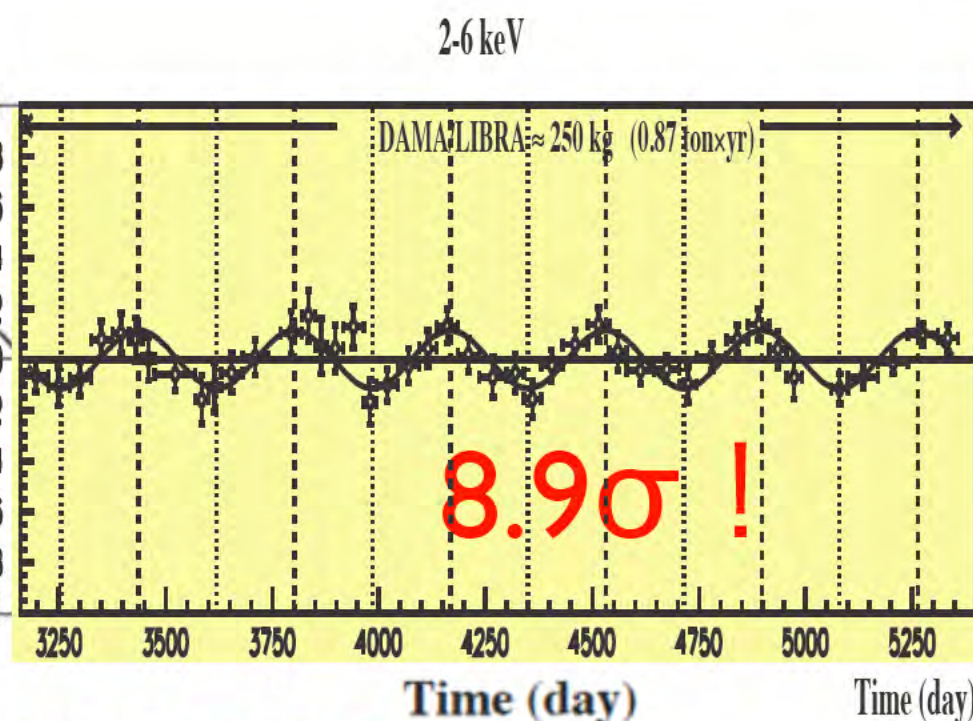
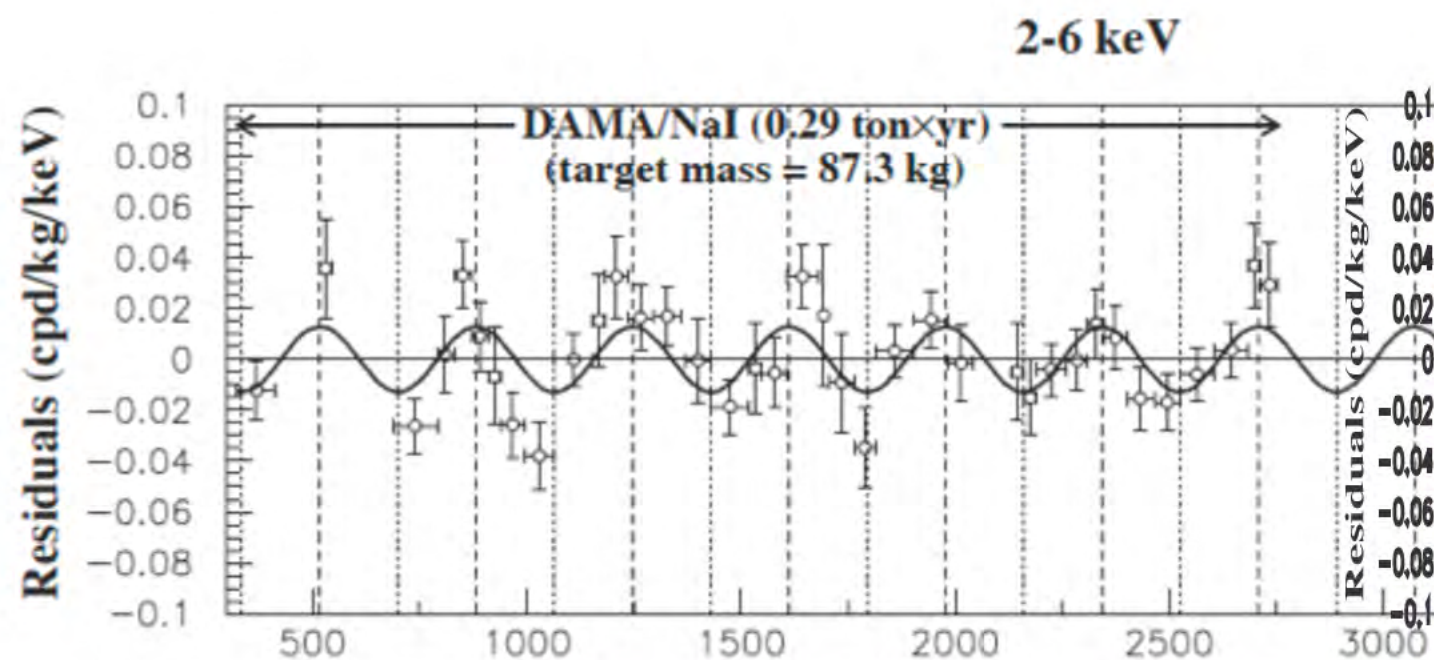
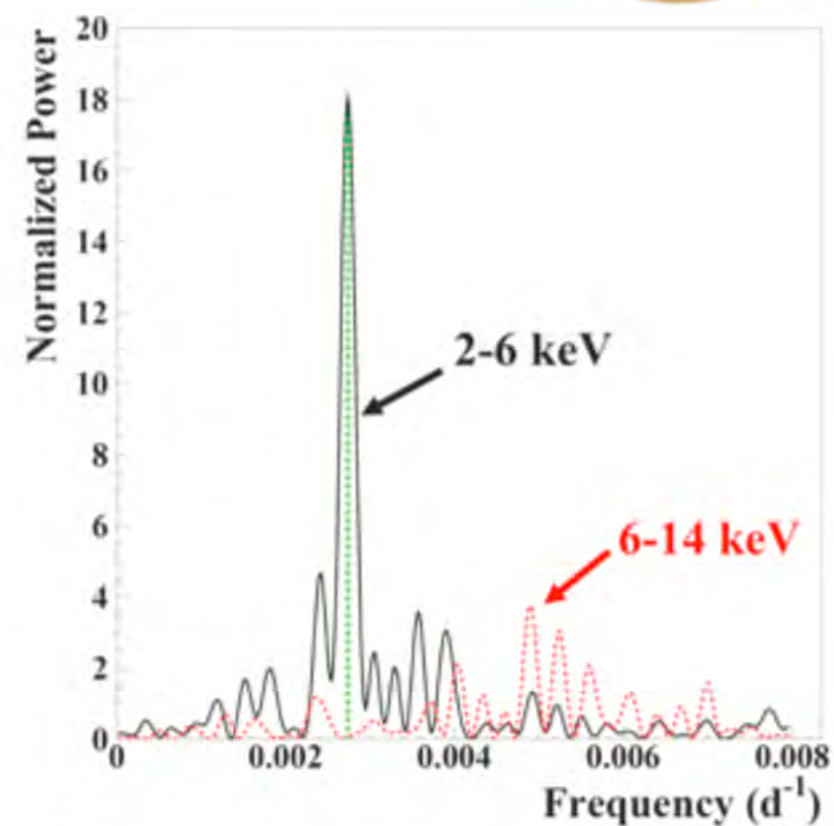
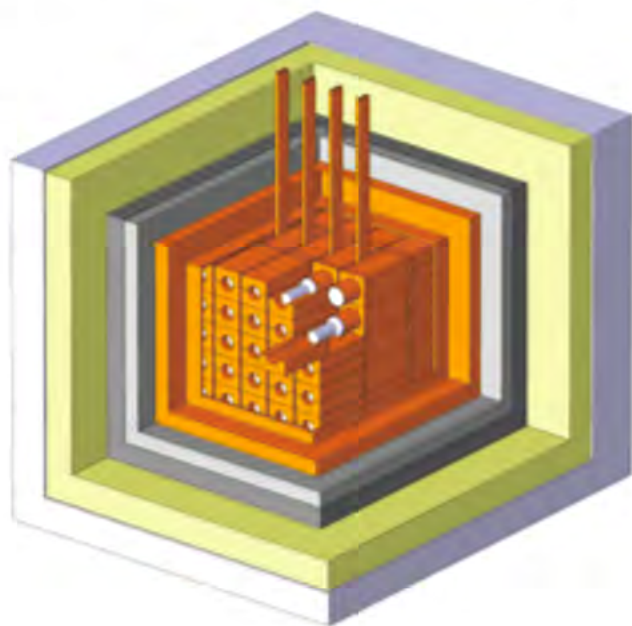
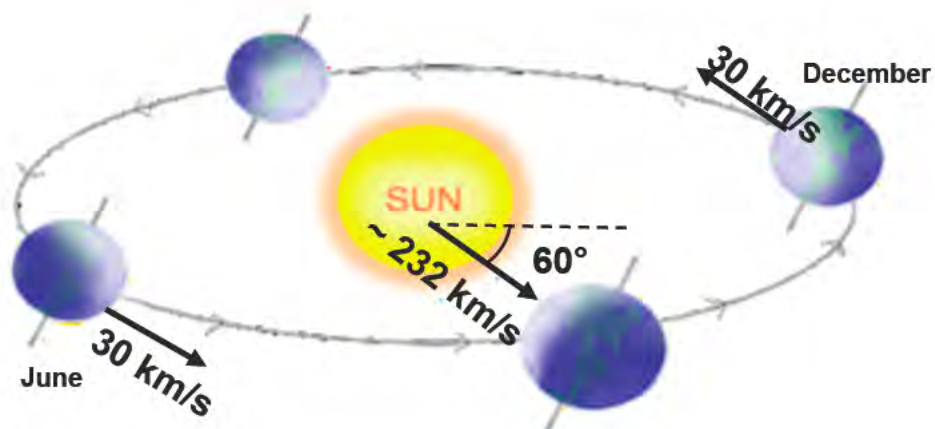
~50桁

宇宙初期に適量
作ることが可能,
LHCで発見の可
能性もある

暗黒物質は既に直接検出されてるのか？

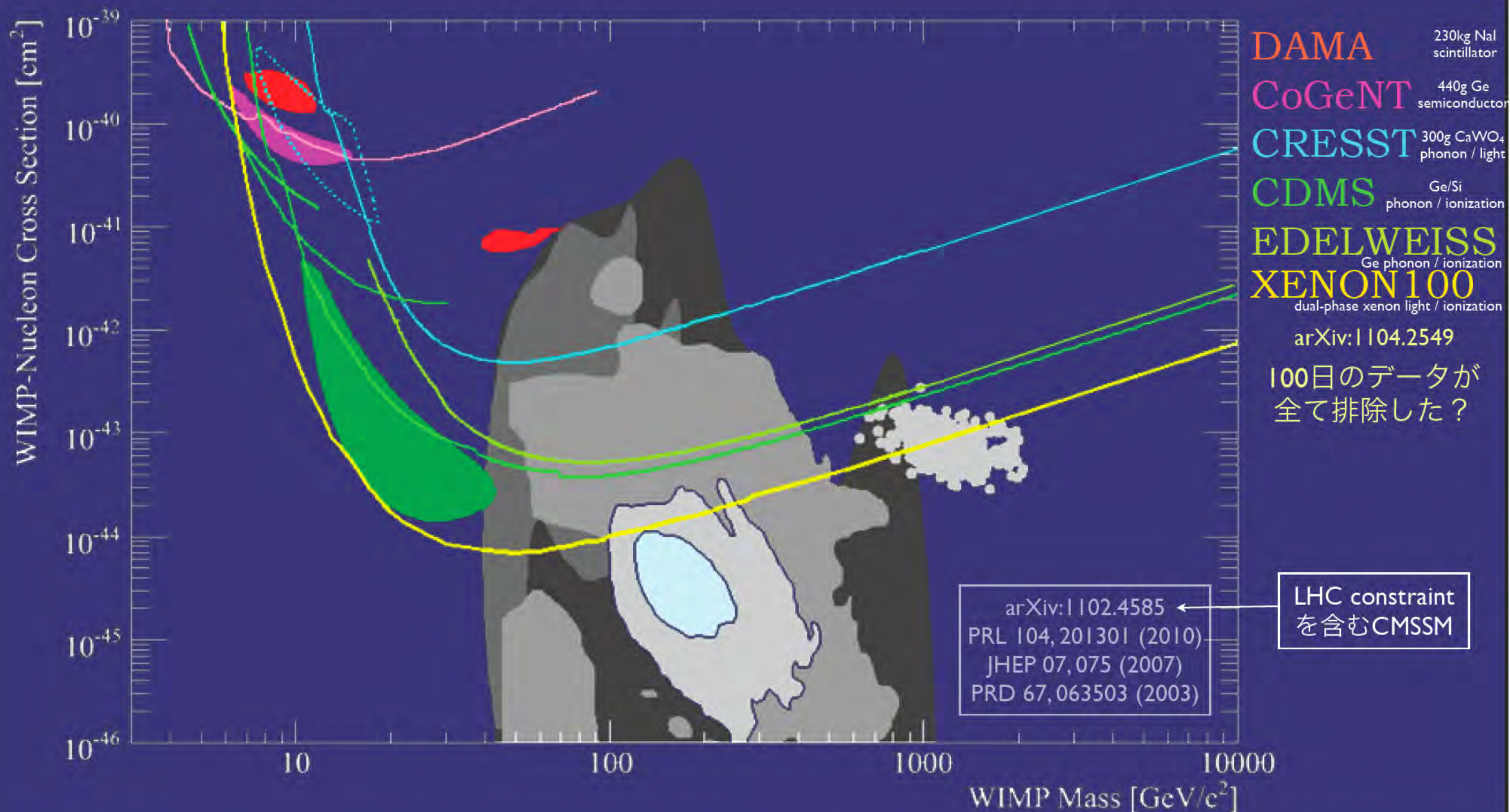


DAMA/NaI+LIBRA



銀河ハローの暗黒物質の証拠？

Direct Search Summary



Positive signal DAMAの季節変動、CoGeNTの低エネルギー事象（exponential BGでも可）、
 CRESSTのOバンド事象、CDMSの2事象（BGとconsistent）

consistency ? Na channeling効果、Xenon L_{eff} の不定性で活路有り！？ inelastic DMは？
 イオン化効率↑ 発行効率

暗黒物質探索の方針

- まずは頑張って見つける。CMSSMをカバーしたい（1ton位？）。
~10⁻⁴⁶ cm²
- DAMA/LIBRAの検証も必要

うまく見つかったら

信頼度の向上 → 高統計化
季節変動
方向測定

質量測定 → エネルギースペクトル
他原子核

くわえて

DAMA検証 → NaIでの探索（逃げ道を断つ）

見つからなかったら

感度向上 → 大型化

軽い質量の感度向上

アクシオンなど他の可能性

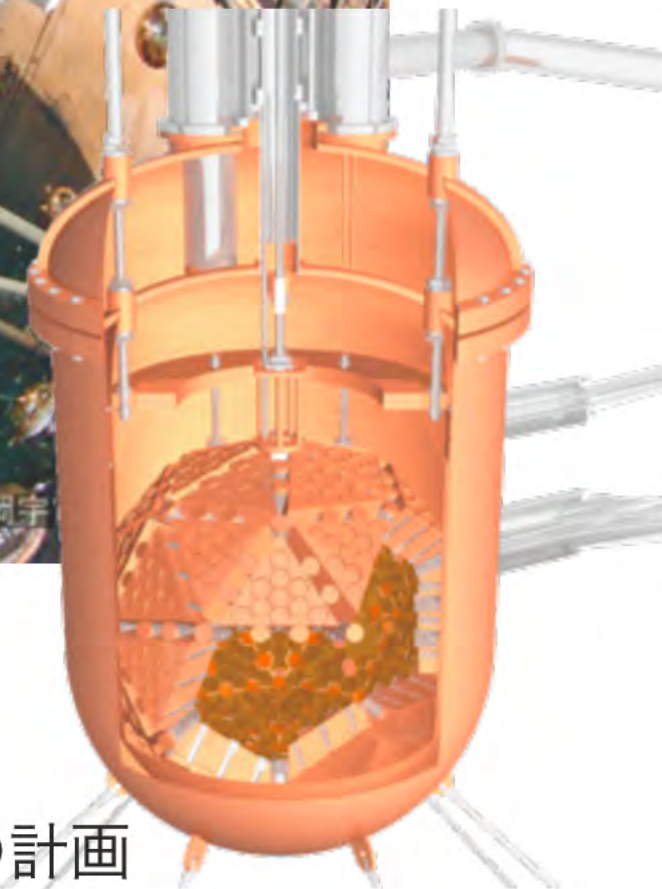
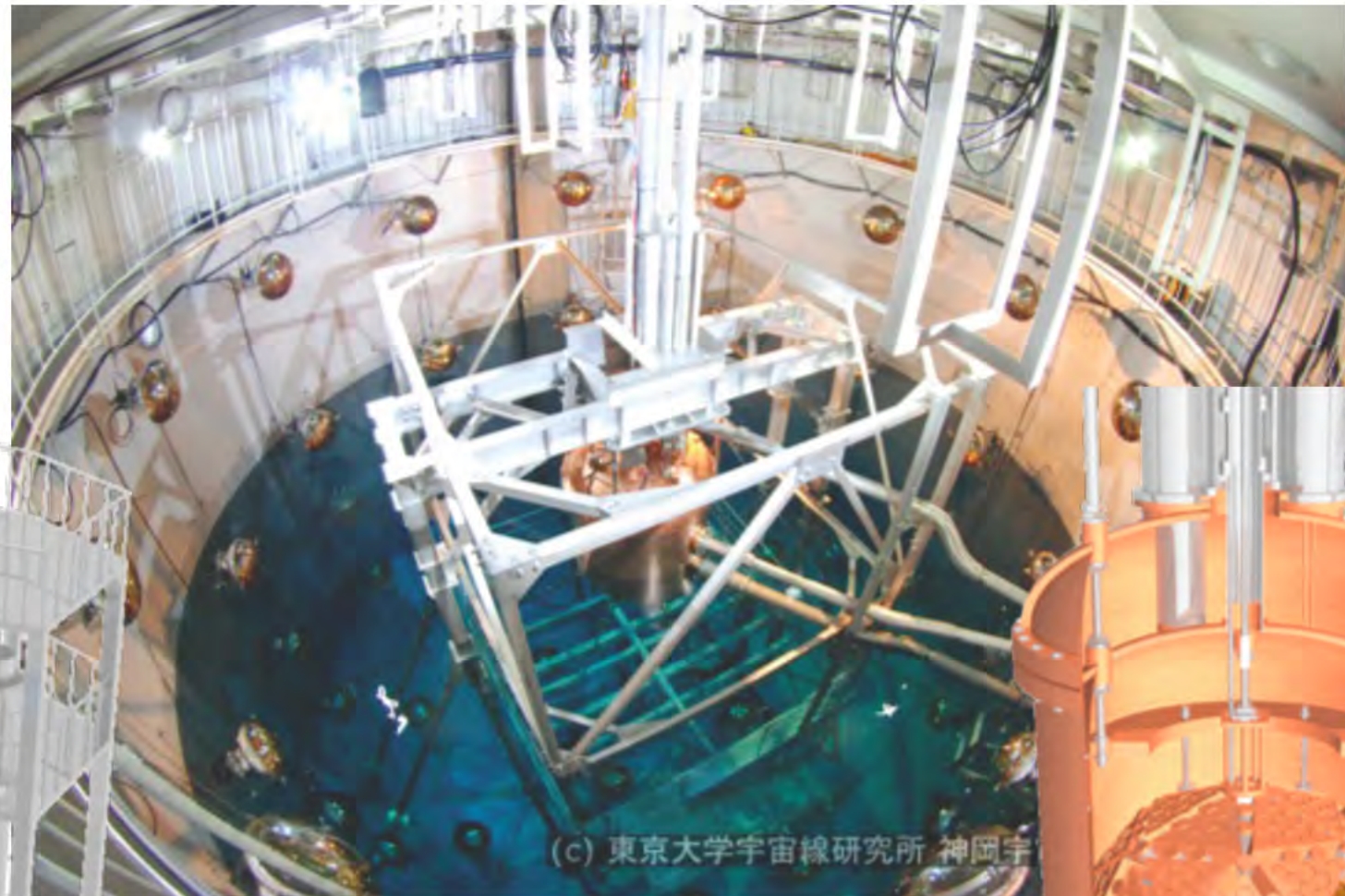
国内 計画

高統計化・季節変動	→	XMASSフェーズ1.5(FV1ton), フェーズII(FV10ton)
方向測定	→	NEWAGE（京都） エマルジョン（名古屋）
NaIでの探索	→	PICO-LON（徳島）

XMASSは高いスケールビリティ

東大

シンプルな構造：液体キセノンシンチレータ
まずmassiveなXMASSで見つけないと、
ファンシーな装置では目標設定が難しい。



巨大なタンクは20ton(FV10ton)
も収容できる。↑

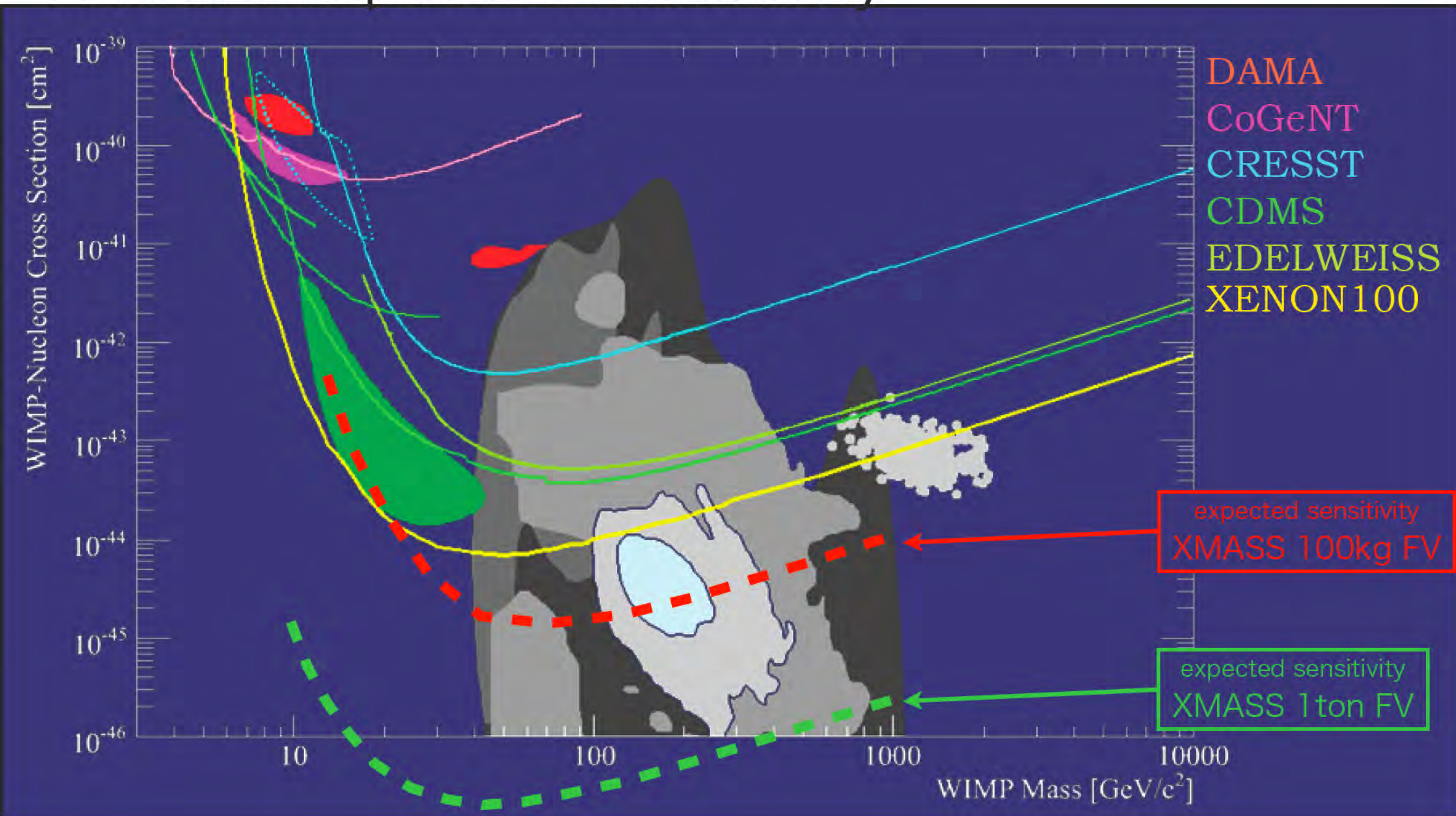
$0\nu 2\beta$ (30meV), solar ν (pp) も視野に

現在FV100kgが進行中

FV100kg→1ton→10ton の計画

フェーズ1.5 フェーズII

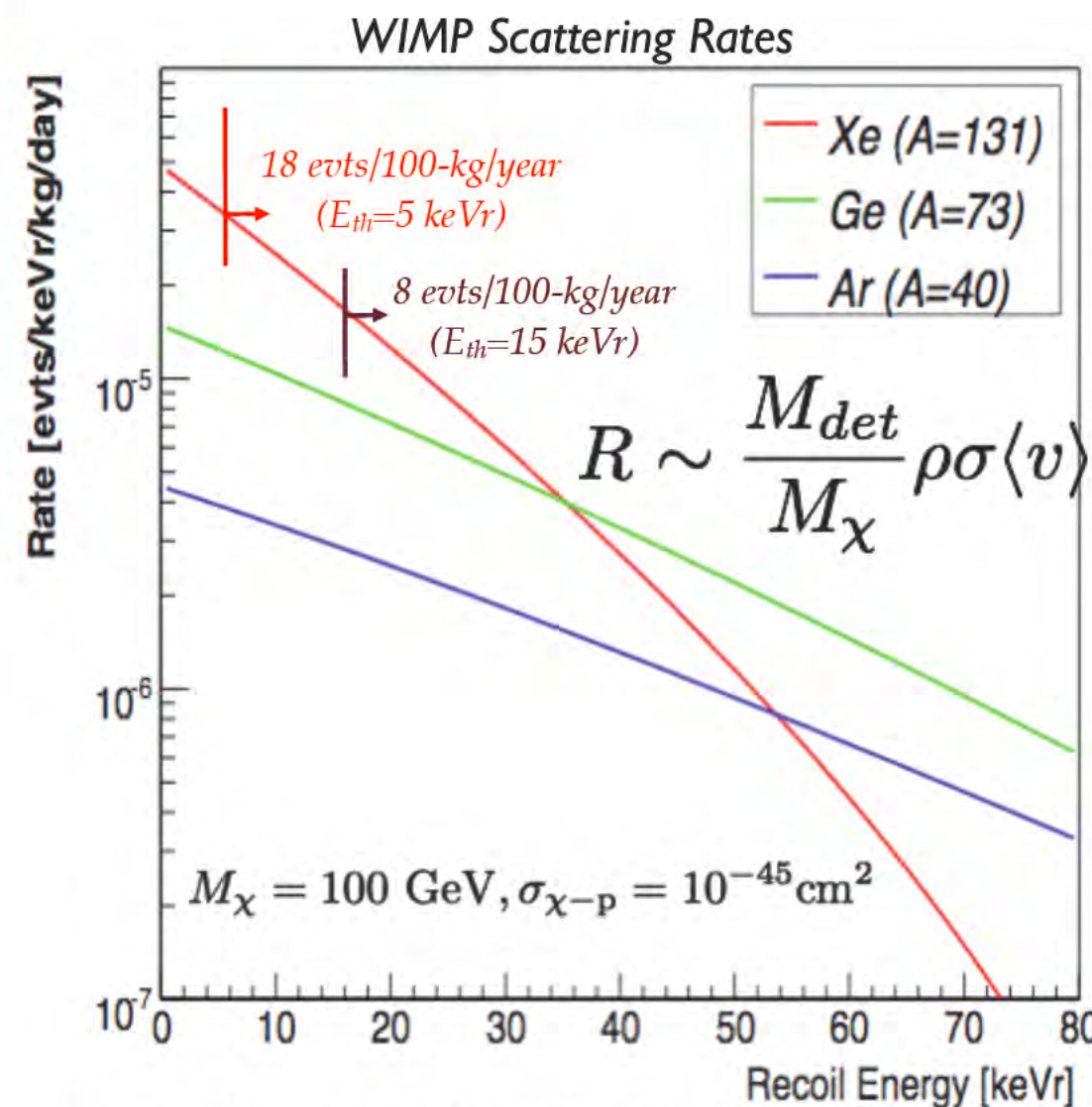
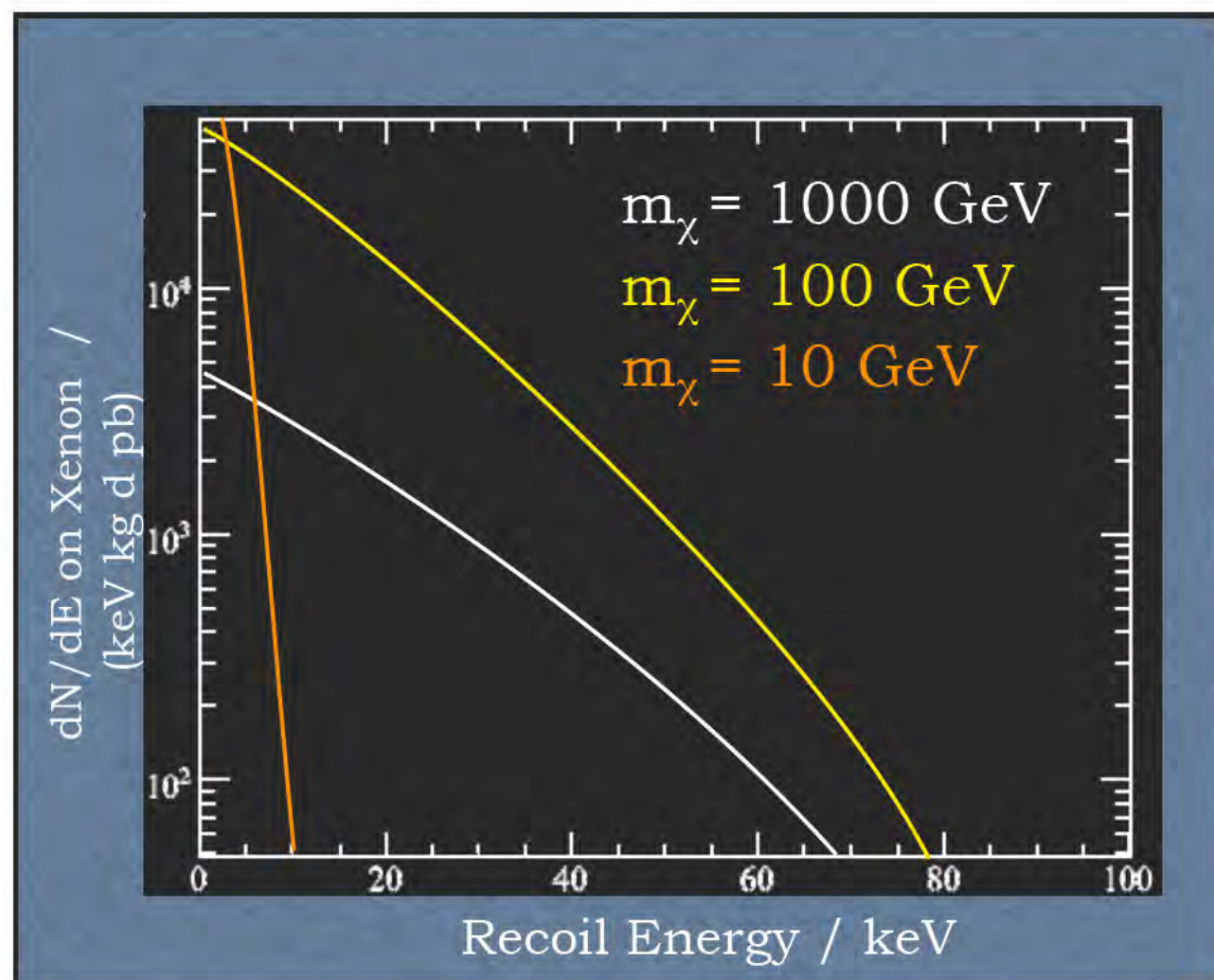
XMASS expected sensitivity



フェーズ1で見つかれば、フェーズ1.5では季節変動やスペクトル測定が可能
見つからなければ、フェーズ1.5では 10^{-47}cm^2 (@50GeV) 程度まで探索可能

軽い質量側の感度は上がるか？

質量測定



recoil spectrum からも可能だが、

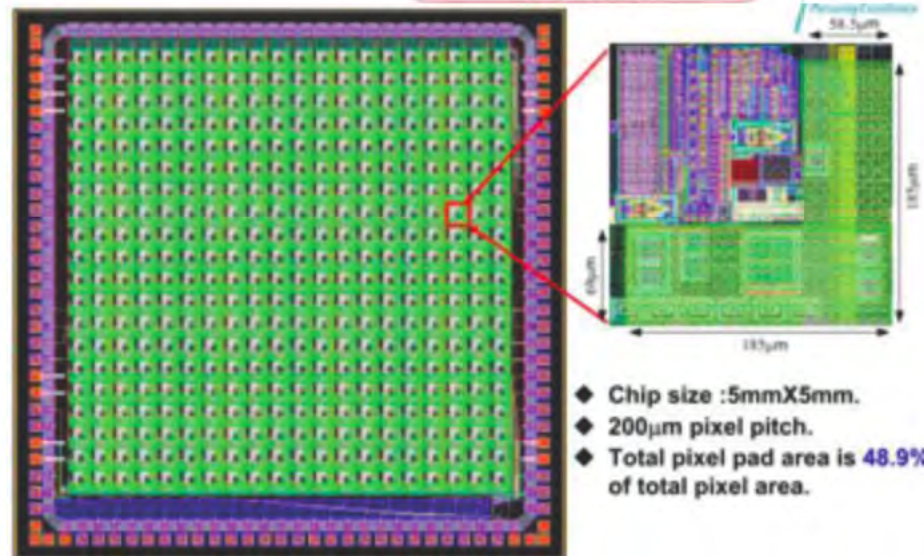
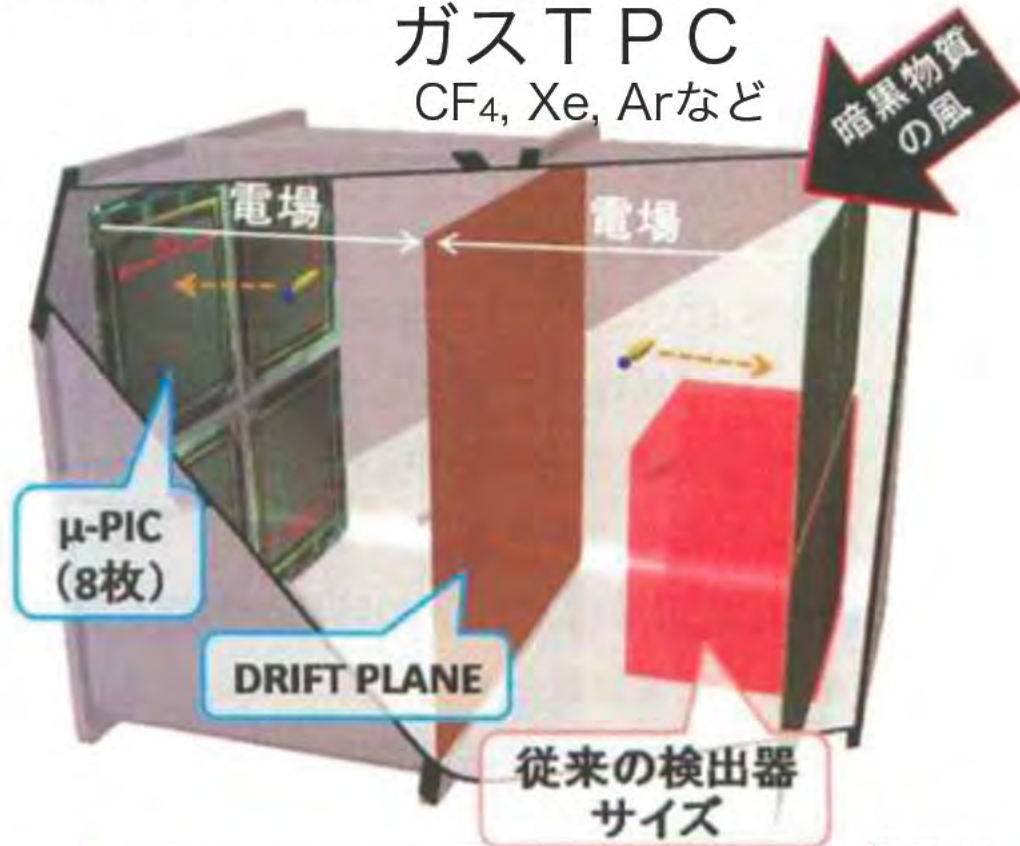
他の原子核もあるとより確実

イオン化効率や発光効率、ハローDMのモデリングなど
 他原原子核・手法があれば、総合的に解決しやすいはず。
 Spin Dependent も調べたい。

方向測定

NEWAGE 京大

ガスTPC
CF₄, Xe, Arなど



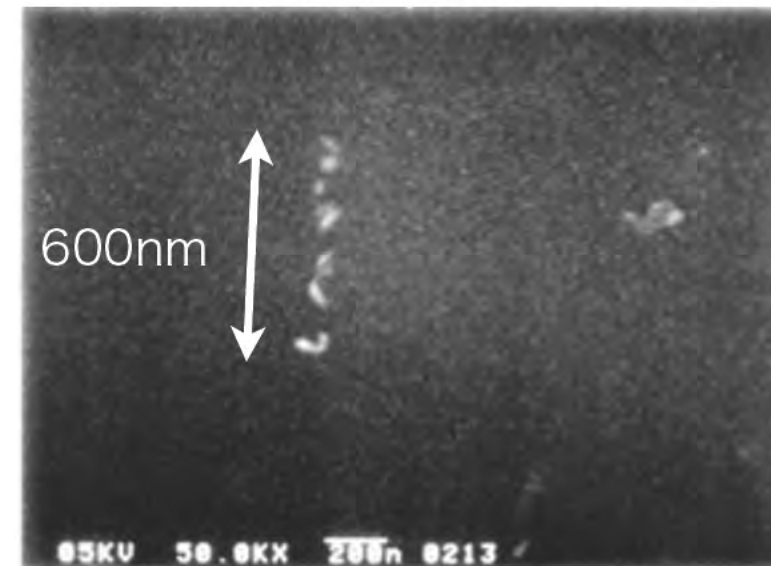
μPIC(ストリップ) → QPIX (ピクセル)

30cm角→60cm角(2015)→1m角(2020)×100台
キセノンで~500kg

名大

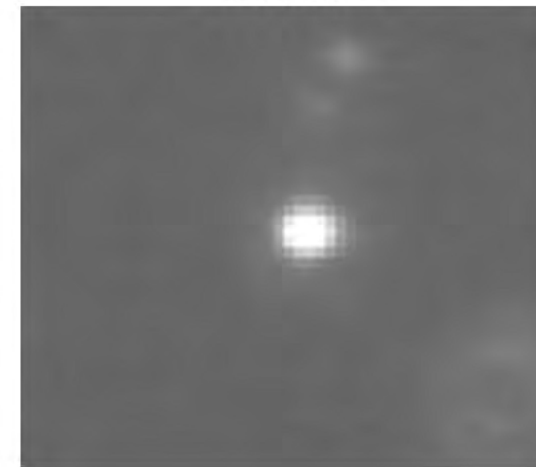
エマルジョン！

電子顕微鏡



Kr³⁺
1200km/s

顕微鏡

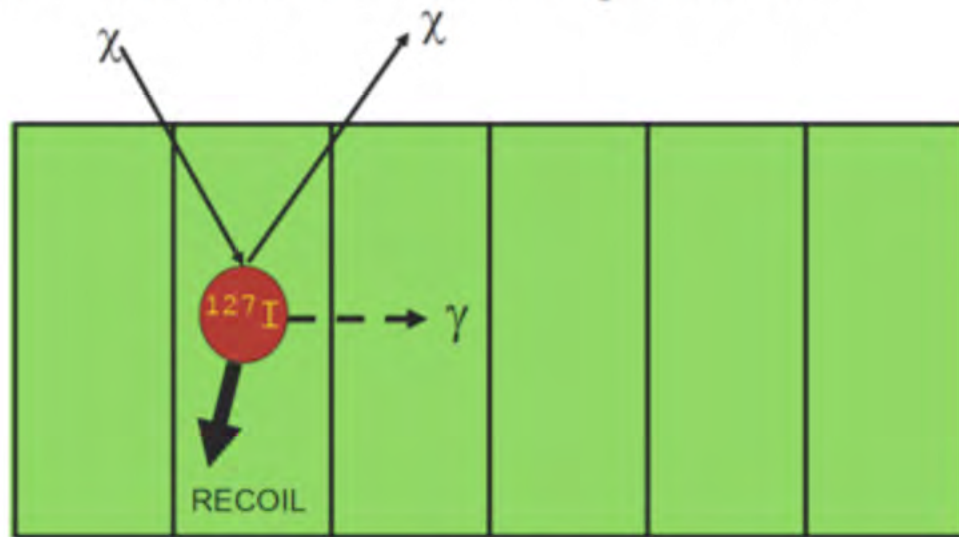


ゼラチンの膨張を利用して
x-y方向に拡大

NaIでの測定

PICO LON 徳島大

Signal identification by segmentation
for dark matter search experiment



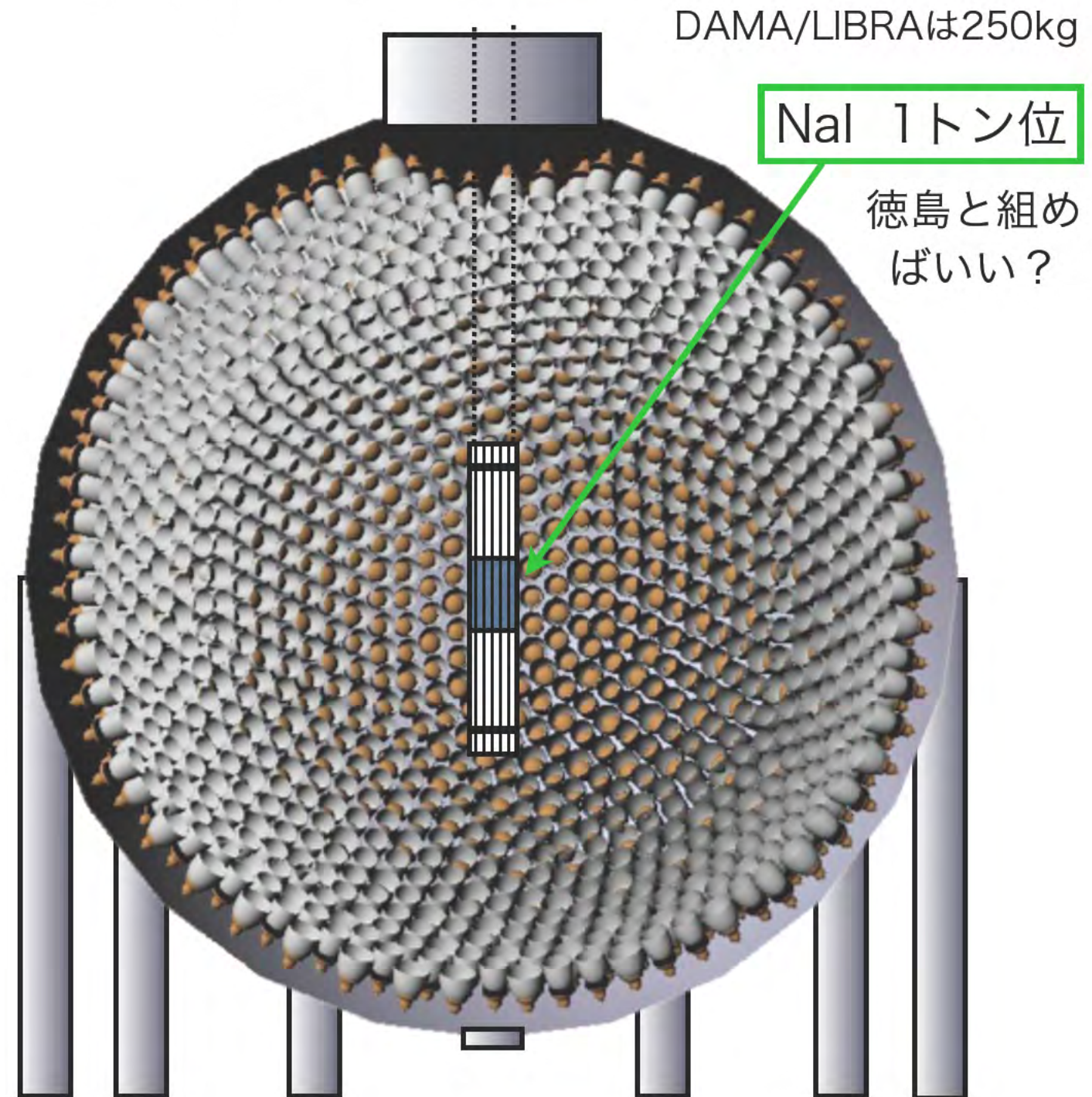
1モジュールのテスト



15cm×15cm×0.1cm NaI結晶

KamLAND2-NaI 東北大

大きいので何でも入る



$0 \nu 2 \beta$

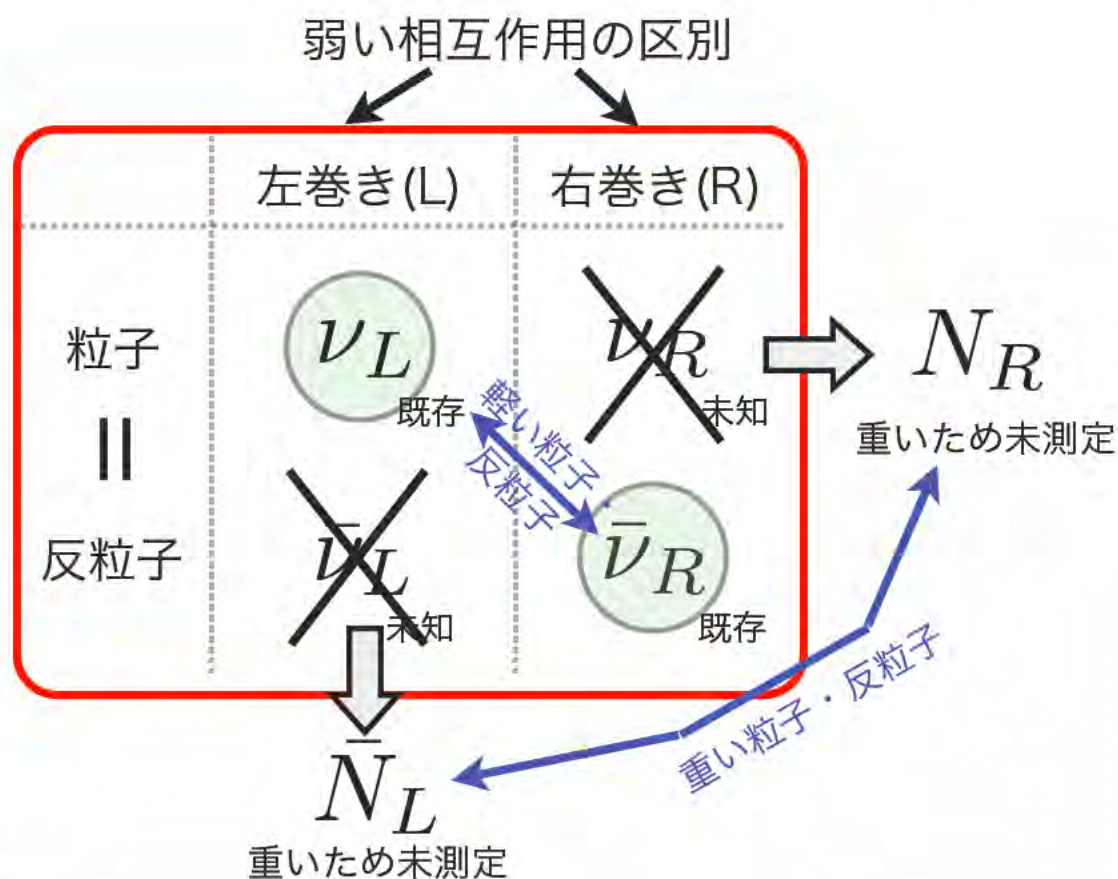
物質 反物質
 たとえば e^- e^+
 明らかに別の粒子

中性のニュートリノは？

ν ニュートリノ
 左巻き

$\bar{\nu}$ 反ニュートリノ
 右巻き

質量が発見された現在では回転方向では区別できない



ディラックニュートリノ

$\nu \neq \bar{\nu}$ 既存と同質量の
 ν_R $\bar{\nu}_L$ が必要。



マヨラナニュートリノ

$\nu = \bar{\nu}$

右巻き (未知) の質量は自由に設定できる。レプトン数を保存しない。
 ディラックスピノルの実数表現を発見

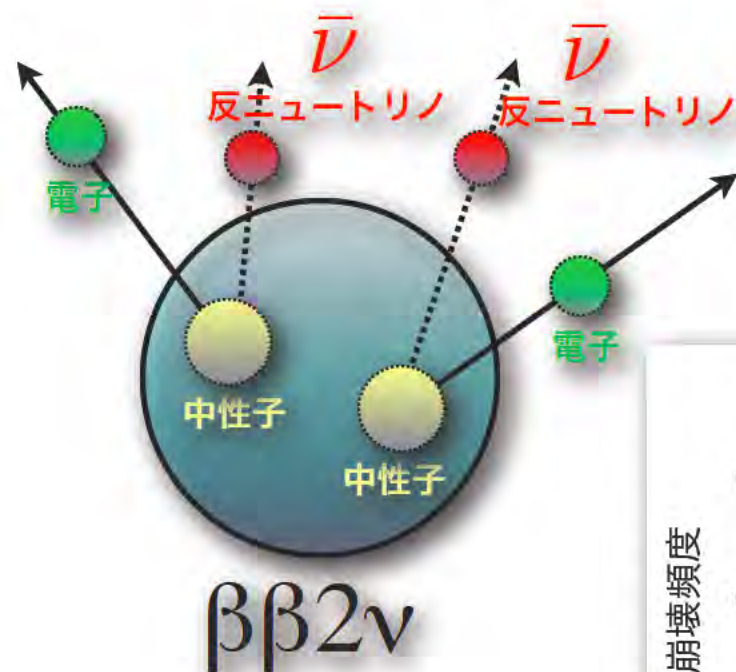
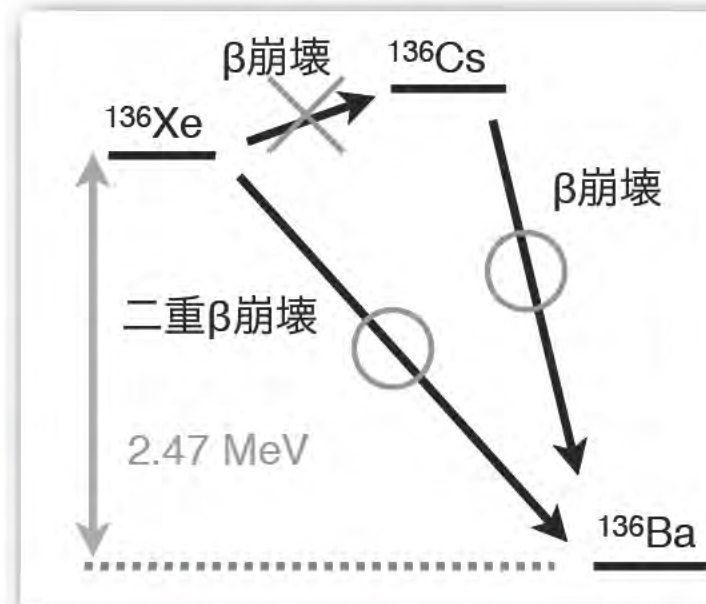


ニュートリノレス二重 β 崩壊

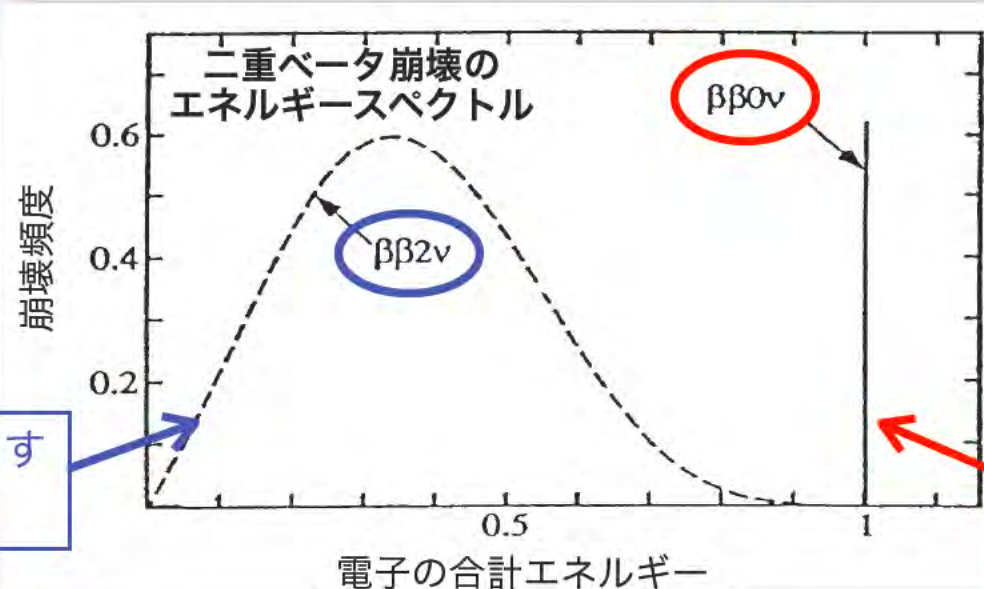
ニュートリノの質量起源を説明し大統一理論と密接に関係するシーソー模型や宇宙の物質優勢を説明するレプトジェネシス理論の基礎となるニュートリノのマヨラナ性を実証する唯一の手法である。
ニュートリノ質量構造の決定にも最も感度が高い。

二重ベータ崩壊

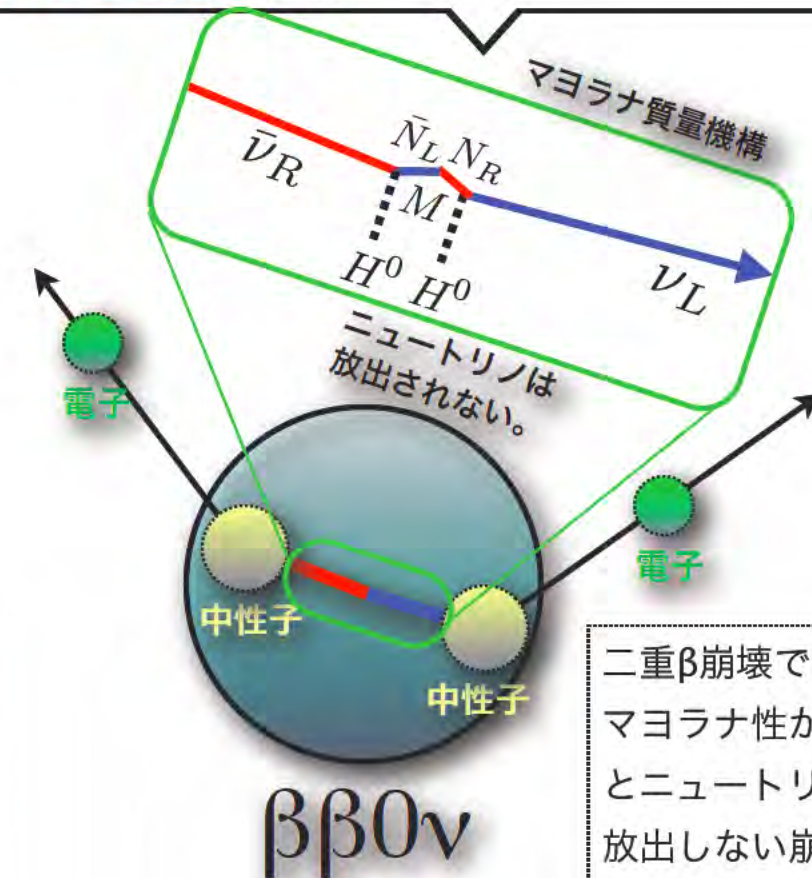
特別な準位の原子核は2つの β 崩壊が同時に起き、2つの反ニュートリノを同時に放出する。



ニュートリノがエネルギーを持ち出すため連続スペクトルとなる。



マヨラナ性は、質量がある反ニュートリノをニュートリノに変身させる。重いほど変身しやすいので、**頻度から質量を測定**できる。



二重 β 崩壊では、マヨラナ性があるとニュートリノを放出しない崩壊が可能となる。

ニュートリノを放出しないため電子の合計エネルギーが大きい。

これを探索する。

発見されなくても、大統一理論のもとニュートリノ質量構造を究明できる。

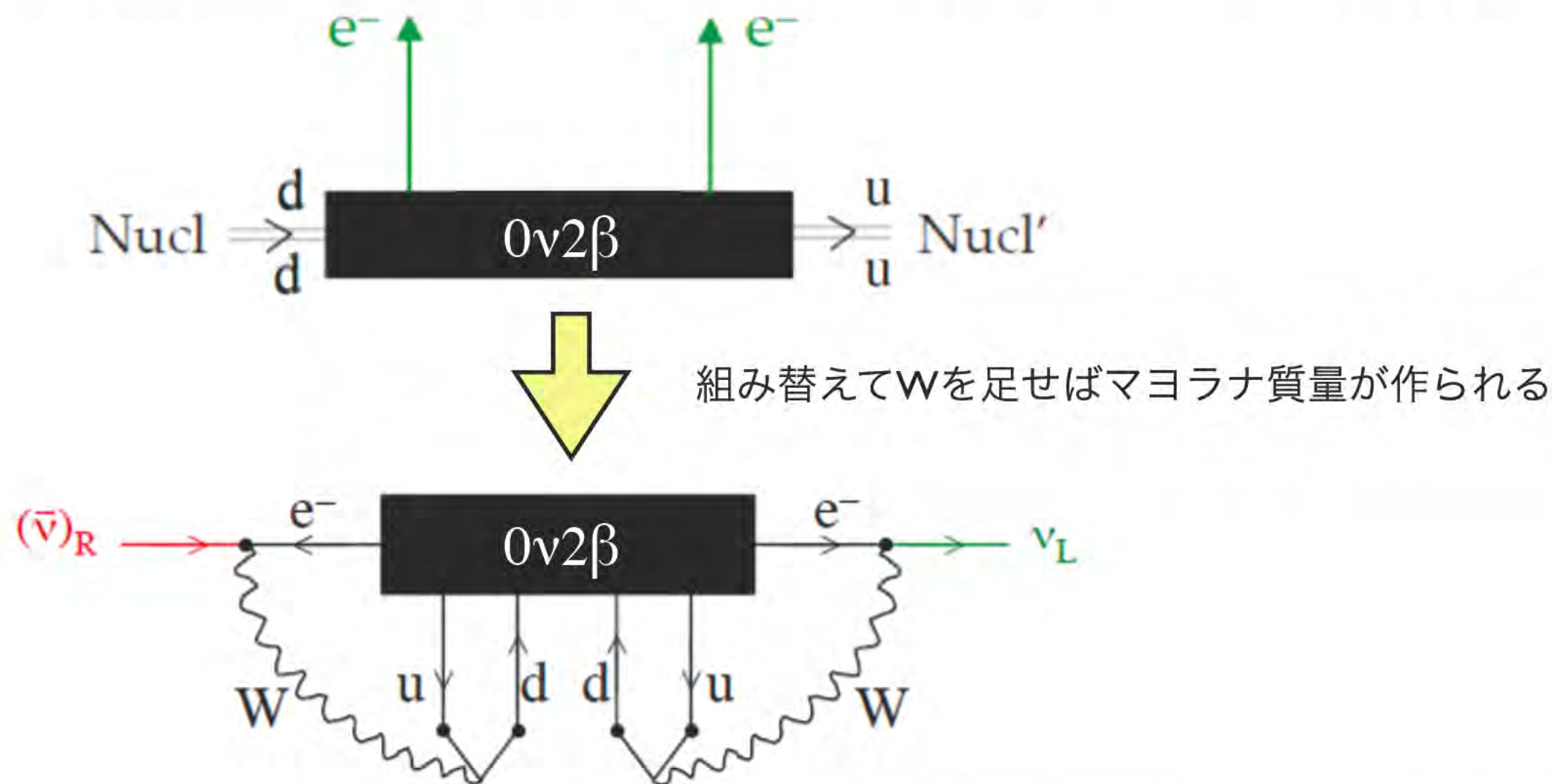
ニュートリノレス二重 β 崩壊の発見

マヨラナニュートリノの証拠
ニュートリノ質量の絶対値決定

ニュートリノ質量機構の解明
大統一理論の選別
宇宙物質優勢の解明への指針

Schechter-Valle theorem

$0\nu 2\beta$ を引き起こす物理は、理論的にはいろいろあり得るが。。。RPV SUSY, V+A



$0\nu 2\beta$ が見つかれば、マヨラナ性とマヨラナタイプの質量は保証される。

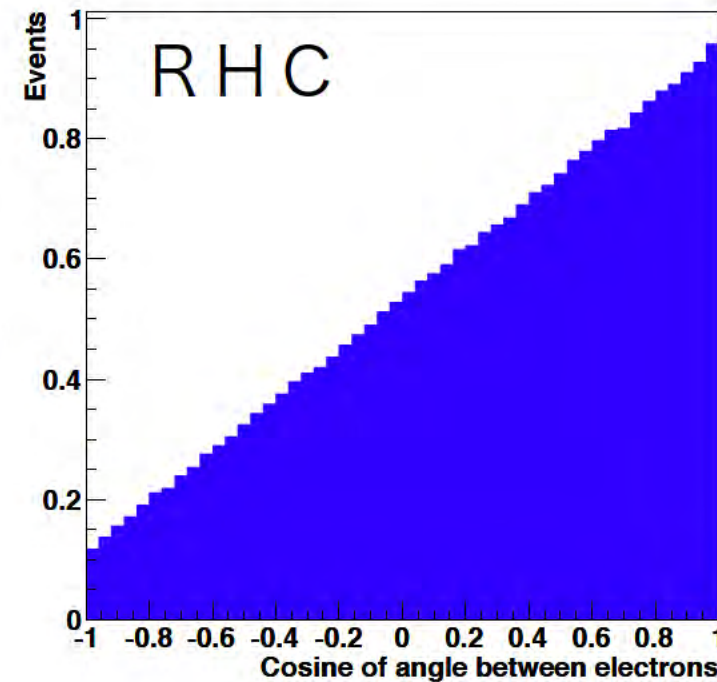
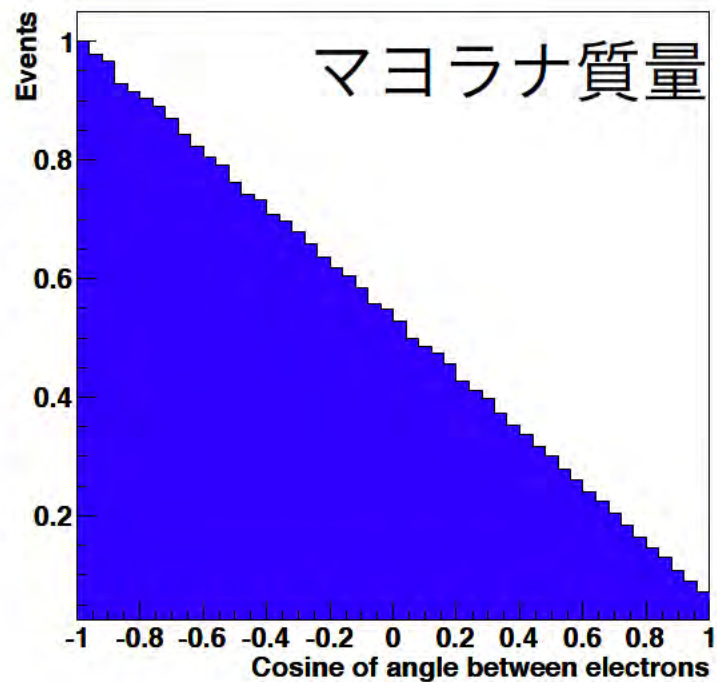
ただし、他の物理の寄与が大きいと、頻度から質量を決定できなくなる。

モデル検証には角分布測定や他原子核での測定が有効

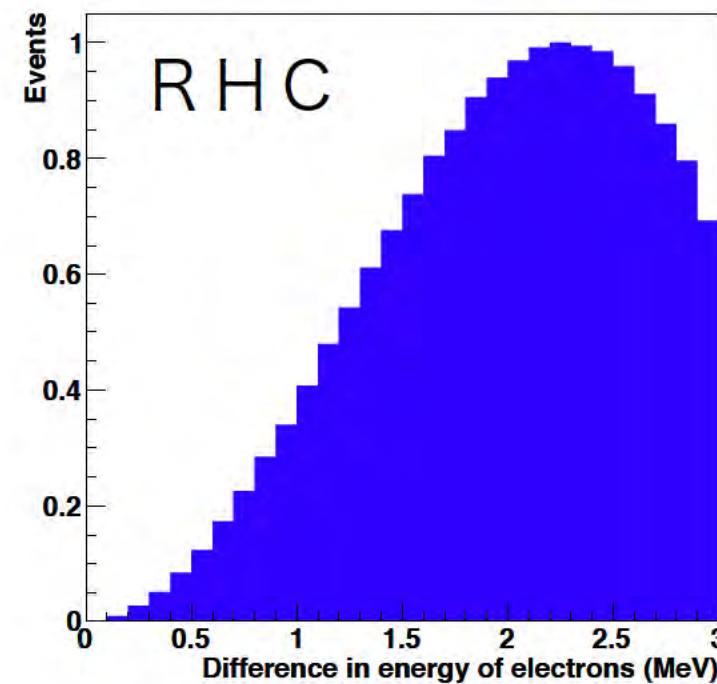
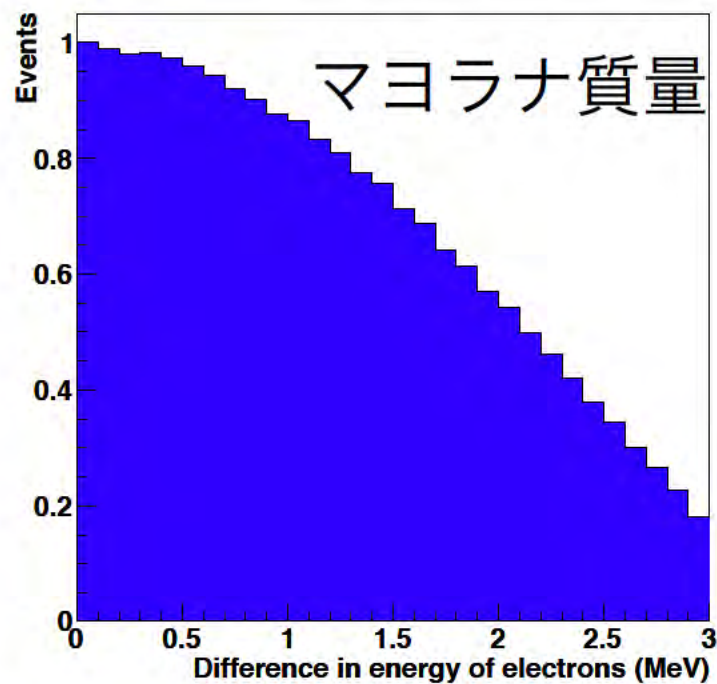
ラッキーなら宇宙論や β 崩壊との統合解析も有効（マヨラナCP測定も視野に）

トラッキングによるモデル識別例

角分布



$E_1 - E_2$



多種の原子核での測定でもモデル識別の感度がある。

二重β崩壊研究のねらい

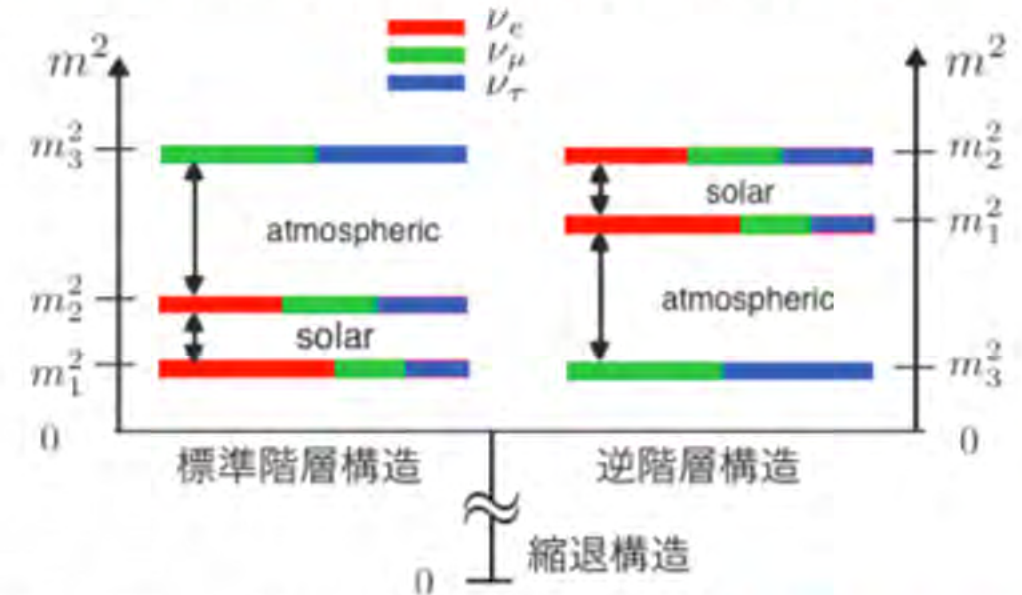
ニュートリノを伴わない
二重ベータ崩壊の測定から

マヨラナニュートリノ

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

とわかる

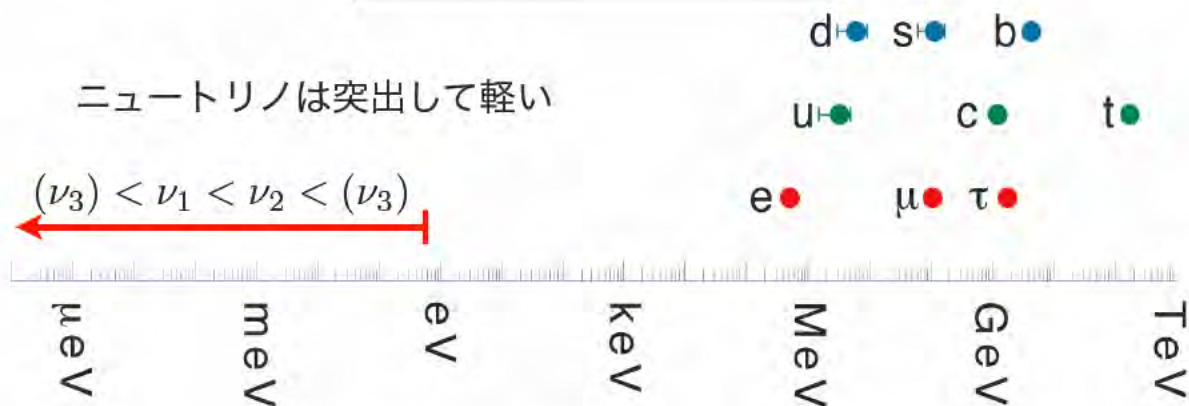
ニュートリノ質量構造がわかる



標準階層か逆階層かあるいは縮退構造か？
質量絶対値は？

波及する研究

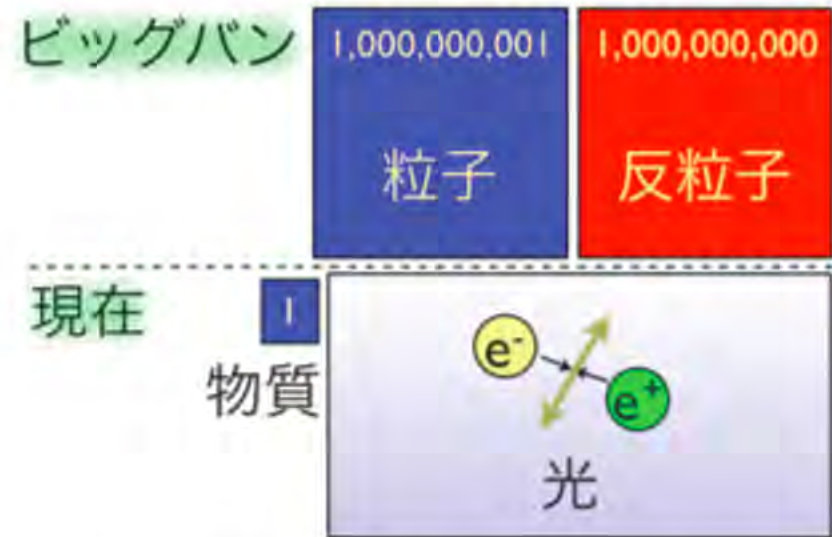
素粒子の質量



なぜ ν は軽いのか？

シーソー機構

ビッグバン



なぜ物質は生き残れたのか？

レプトジェネシス理論

二重ベータ崩壊探索の方針

まずは縮退構造を探索 (~60meV)

縮退構造で見つかったとして

高統計化・BG低減 → 大型化

行列要素の誤差縮小 → 他原子核

モデルの識別 → 他原子核、角分布

見つからなかったら

逆階層構造を探索(~20meV) → 大型化 (消去法・他手法との比較)

KKDCの決着 → ^{76}Ge での探索

β 崩壊や宇宙論的手法でもカバーできればより詳細な物理を研究できる。

国内 計画

大型化 → KamLAND2-Zen ^{136}Xe
CANDLES-V ^{48}Ca
XMASSフェーズIII(10ton)

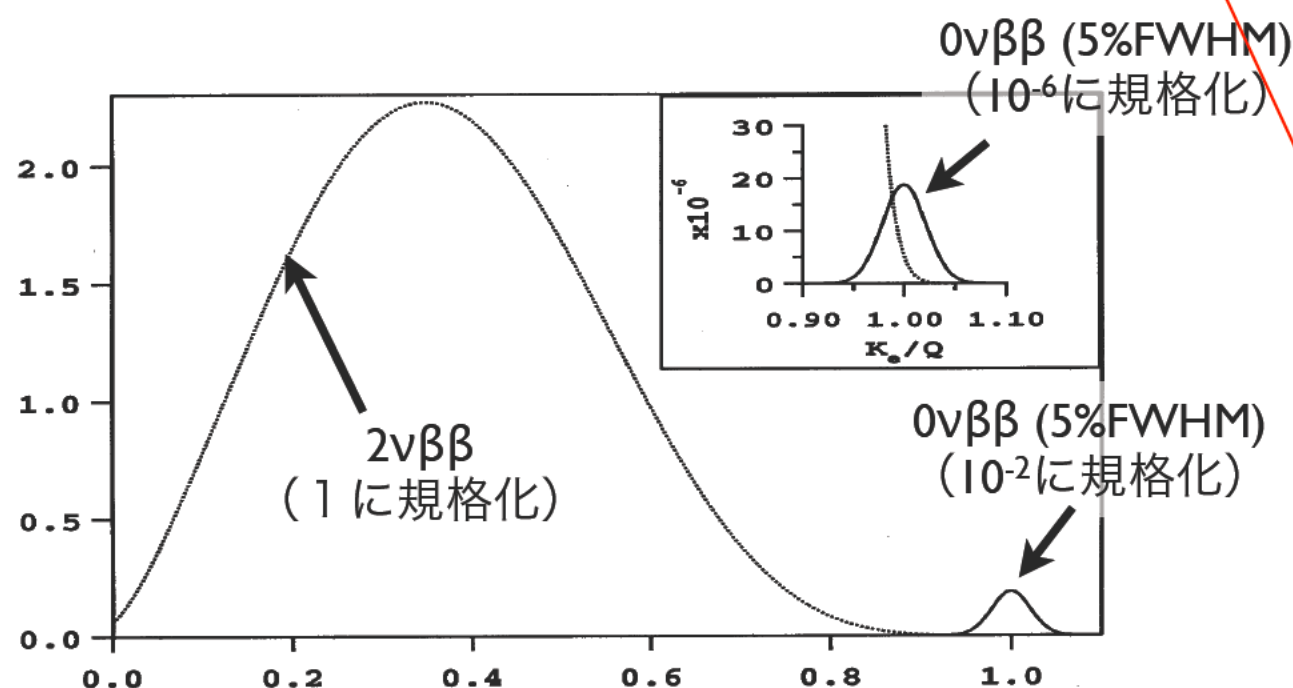
他原子核 → CANDLES-IV ^{48}Ca
その他

角分布 → DCBA ^{150}Nd ほか
エマルジョン 自由度高い
MOON

^{76}Ge での探索 → 国内にはない

二重β崩壊核の比較

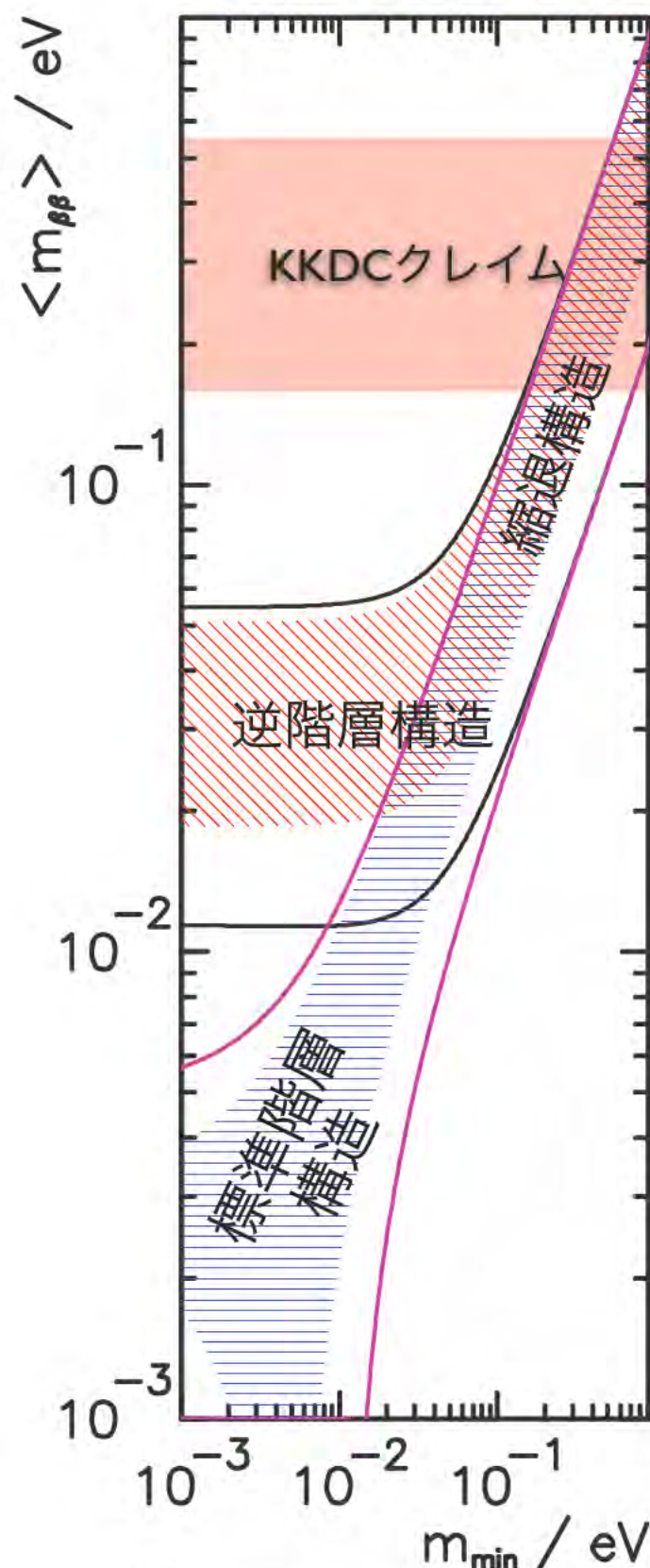
原子核	$T_{1/2}^{0\nu}$ (50 meV)	$T_{1/2}^{2\nu}$ 実験値 (year)	自然存在比 (%)	Q値 (keV)	
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$		$(4.2^{+2.1}_{-1.0}) \times 10^{19}$	0.19	4271	最大のQ、2ν早い
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	0.86×10^{27}	$(1.5 \pm 0.1) \times 10^{21}$	7.8	2039	半導体
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	2.44×10^{26}	$(0.92 \pm 0.07) \times 10^{20}$	9.2	2995	
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	0.98×10^{27}	$(2.0 \pm 0.3) \times 10^{19}$	2.8	3351	
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	2.37×10^{26}	$(7.1 \pm 0.4) \times 10^{18}$	9.6	3034	2ν早い
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	2.86×10^{26}	$(3.0 \pm 0.2) \times 10^{19}$	7.5	2805	
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	2.16×10^{26}	$(0.9 \pm 0.1) \times 10^{21}$	34.5	2529	存在比大
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	4.55×10^{26}	$(2.11 \pm 0.21) \times 10^{21}$	8.9	2476	2ν遅い、希ガス
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	2.23×10^{25}	$(7.8 \pm 0.6) \times 10^{18}$	5.6	3367	0ν、2ν早い



2νが早いと高分解能が必要
分解能の5.8乗位で混入

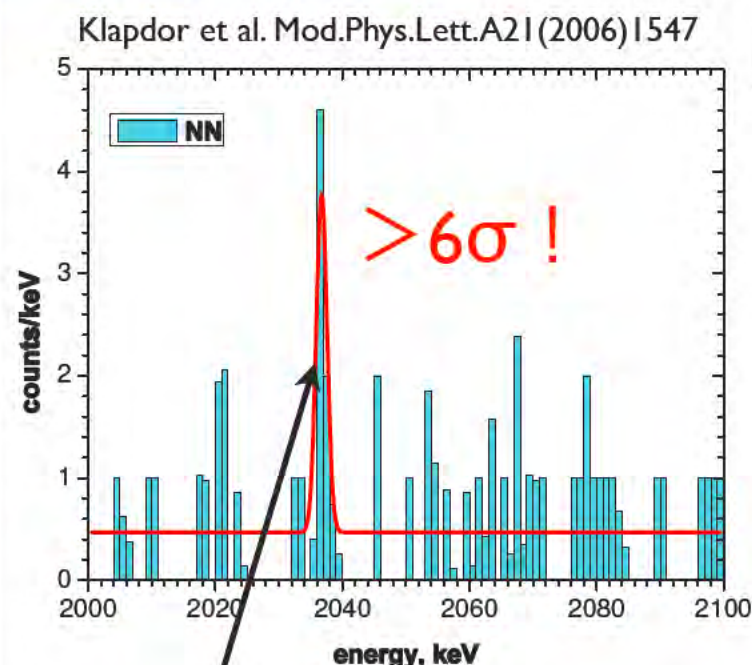
$T^{0\nu} / T^{2\nu}$ が小さいと高分解能
でなくても良い。

Milestone



KKDCクレイム

Heidelberg Moscow実験の一部



11 kgの ^{76}Ge

データ量 71 kg・年

$$T_{1/2} = 2.23^{+0.44}_{-0.31} \times 10^{25} \text{ 年}$$

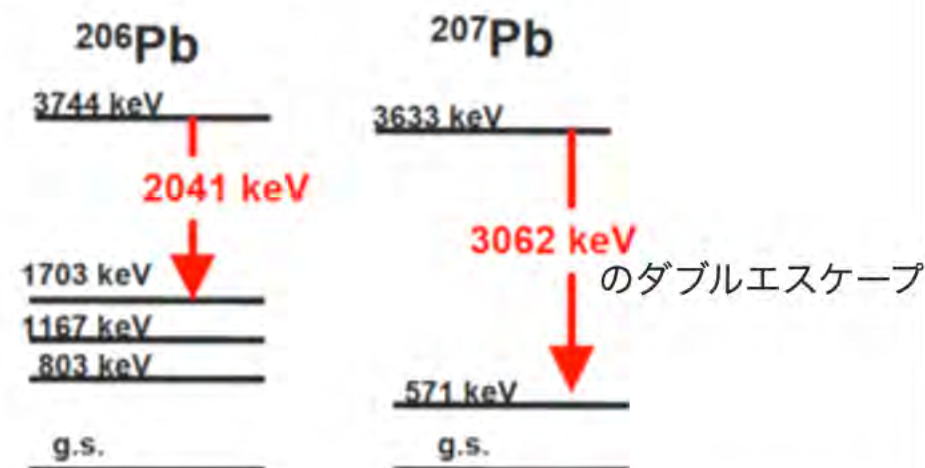
$$m_\nu = 320 \pm 30 \text{ meV}$$

理論の誤差は無視

バックグラウンドの候補

ニュートリノレス二重 β 崩壊の証拠?

統計的有意性は高いがバックグラウンドが多いため信用されていない。

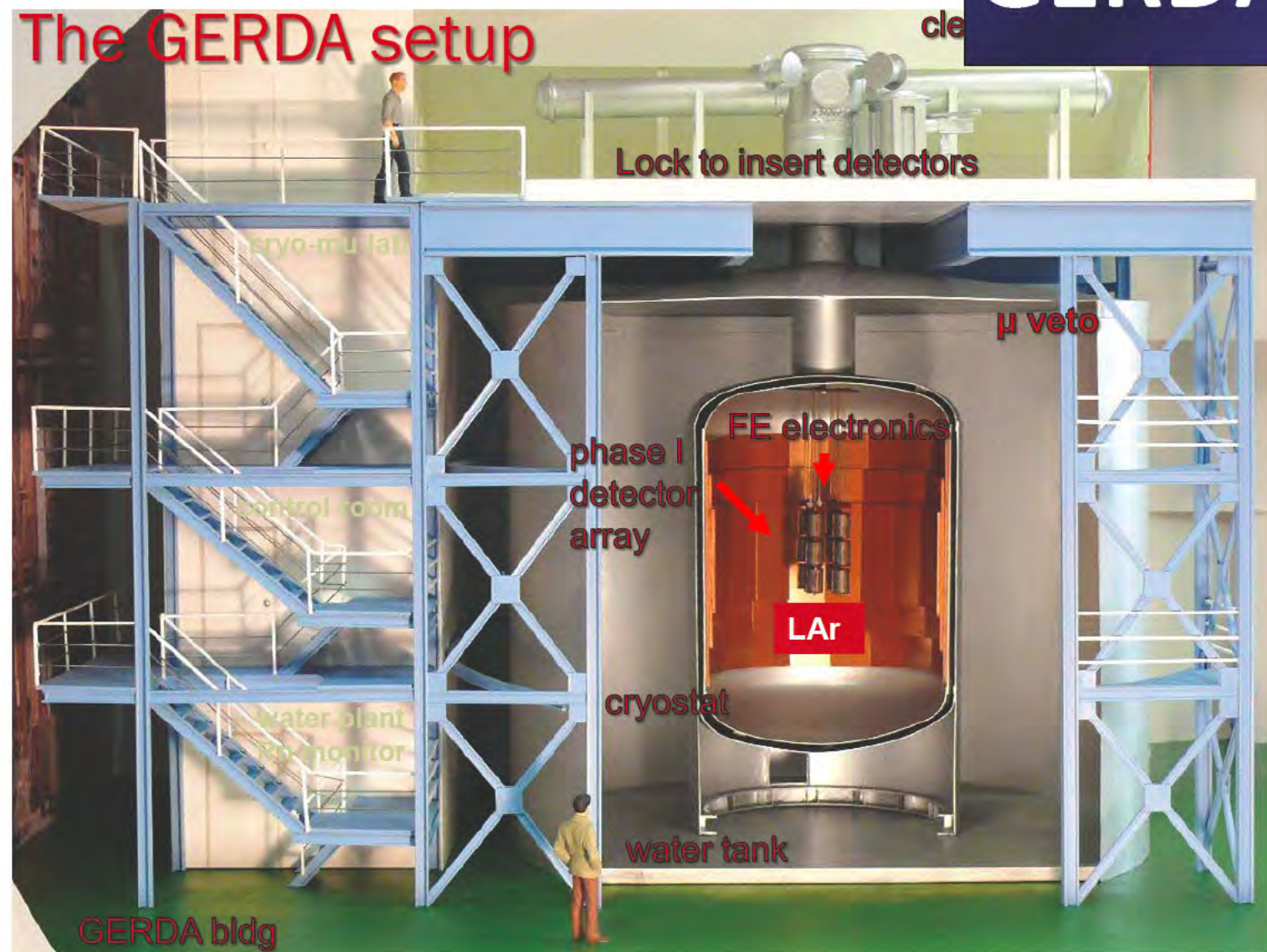


巨大かつ低バックグラウンドが必要!

	half lives	mass
~100meV KKDC クレイム	$\rightarrow 10^{25} \sim 10^{26} \text{ y}$	10~100kg
~60meV 縮退構造	$\rightarrow 10^{26} \sim 10^{27} \text{ y}$	100~1000kg
~20meV 逆階層構造	$\rightarrow 10^{27} \sim 10^{28} \text{ y}$	1000~ kg

GERDA

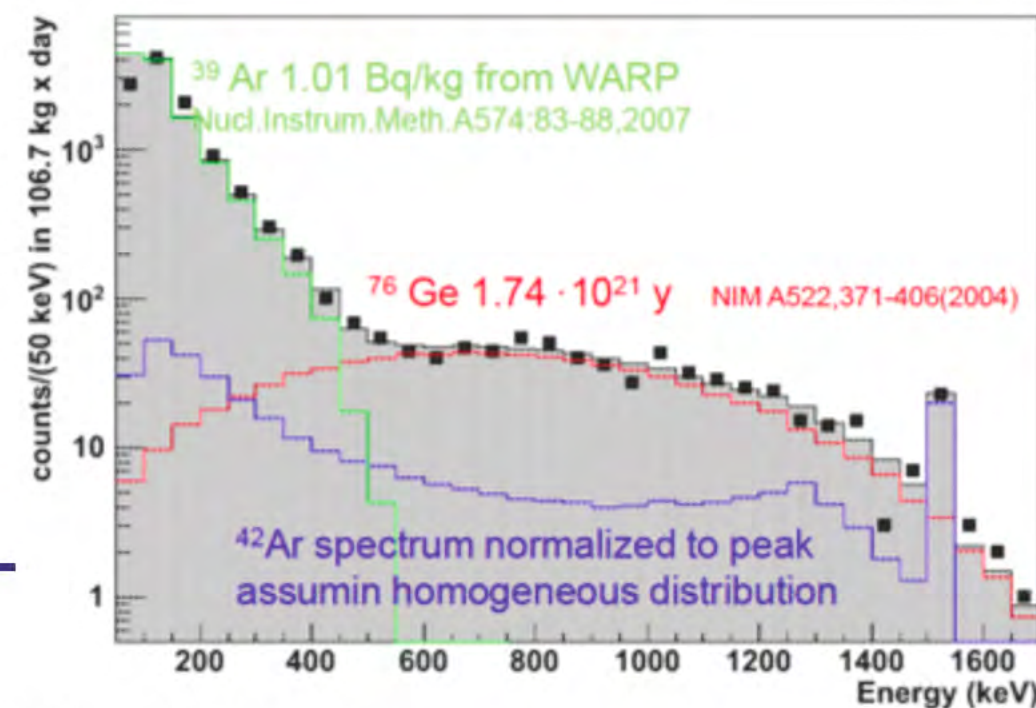
The GERDA setup



Use of liquid argon for active shielding

Segmented detectors in future

Improvement of Pulse Shape Analysis



PHASE I: 17.9 kg of enriched ^{76}Ge (from HM and IGEX)

In 1 year of data if $B=10^{-2}$ cts/keV/kg/yr (check of Klapdor's claim)

taking data at Gran Sasso

$$\langle m_{\nu} \rangle < 0.25 \text{ eV}$$

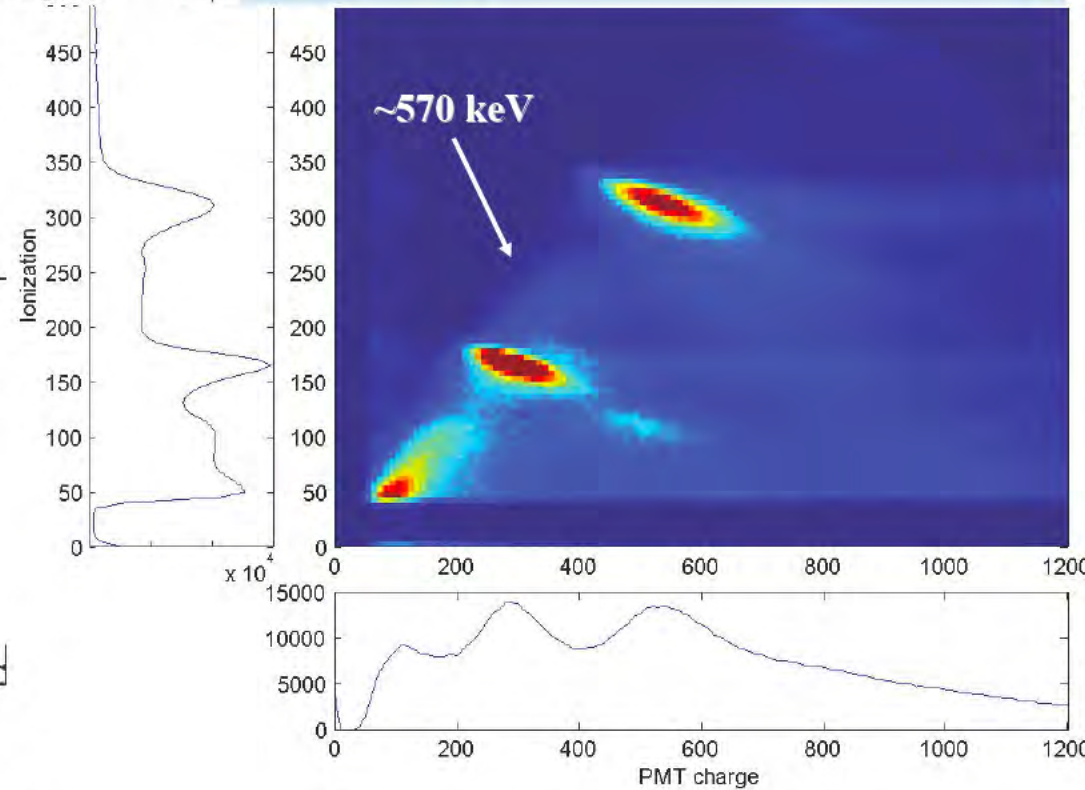
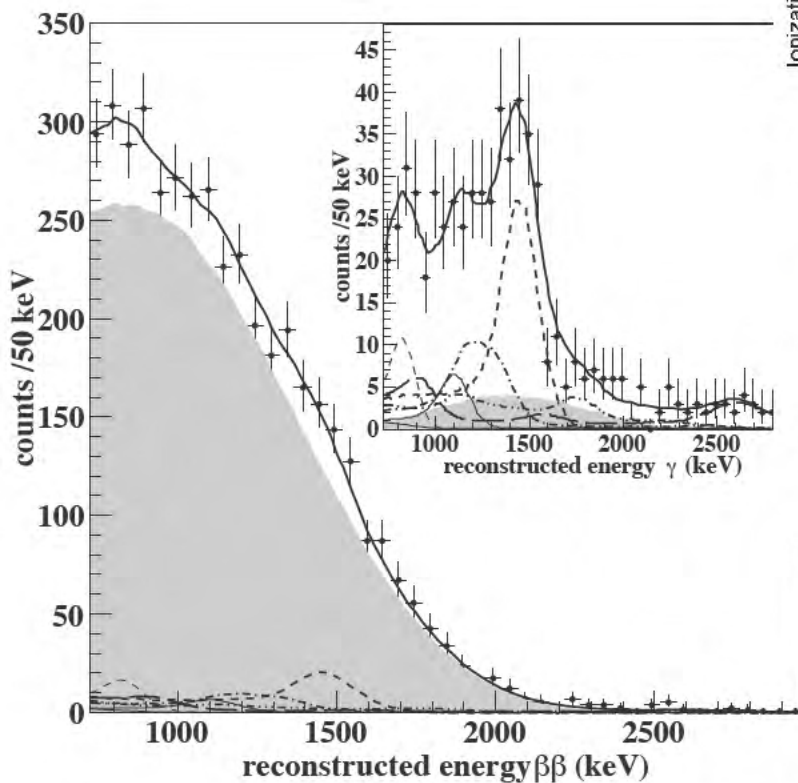
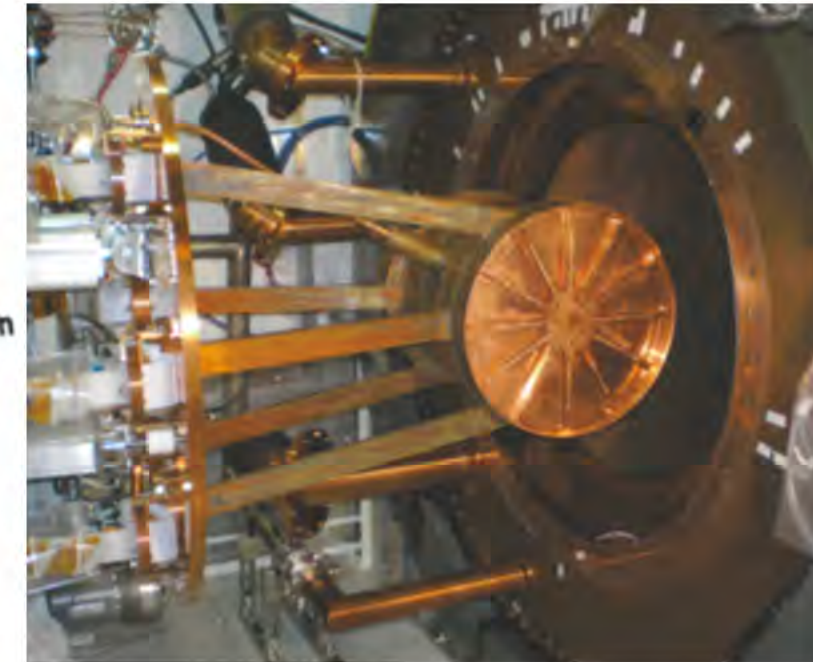
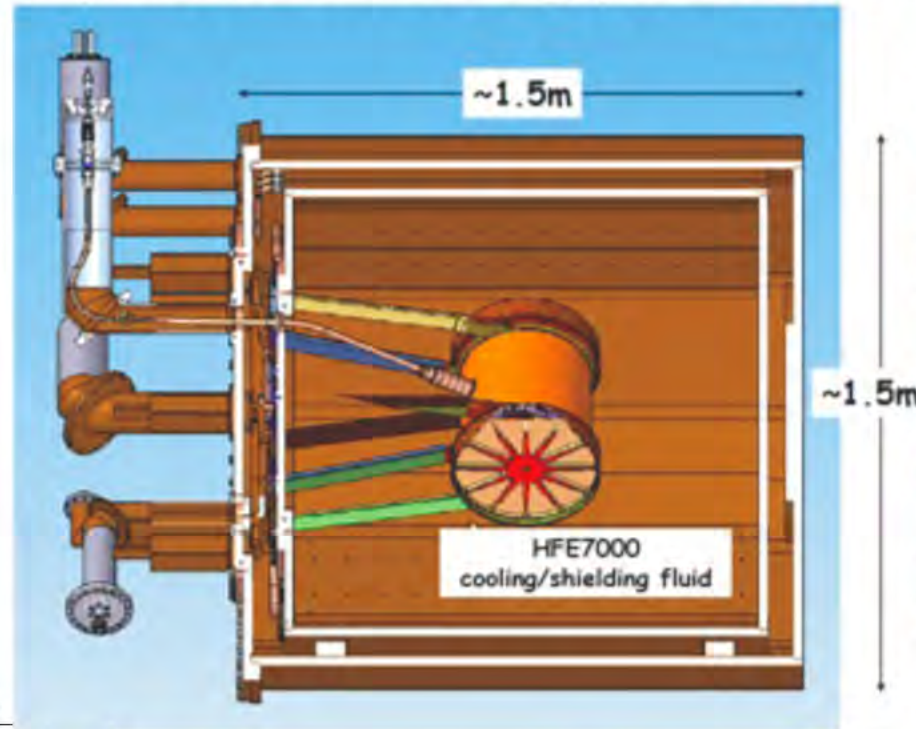
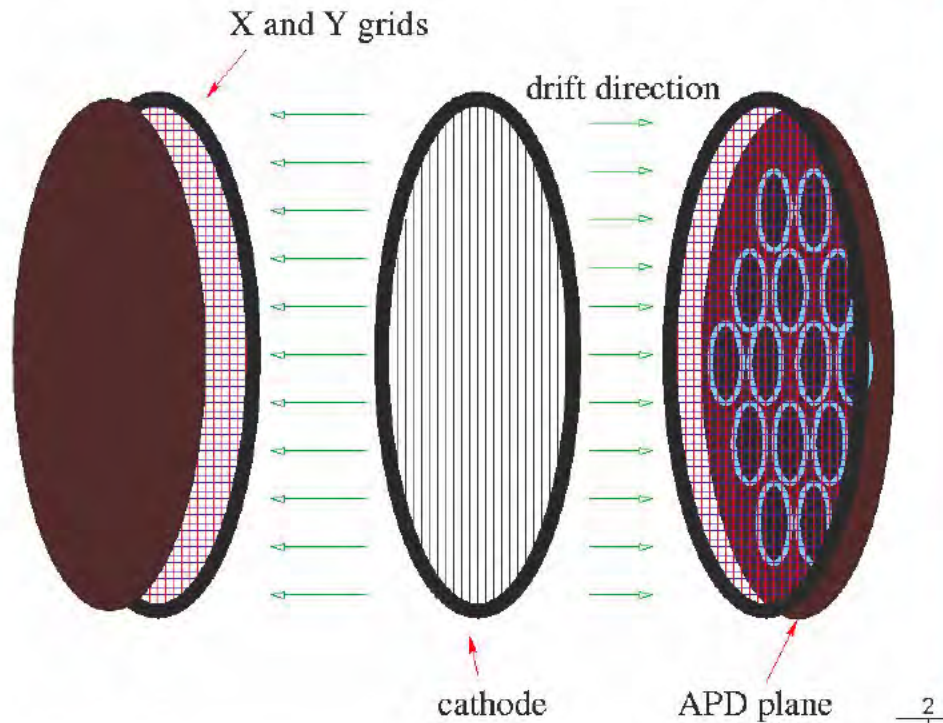
PHASE II: 40 kg of enriched ^{76}Ge (20 kg segmented) 2012

if $B=10^{-3}$ cts/keV/kg/yr

$$\langle m_{\nu} \rangle < 0.1 \text{ eV (3yrs)}$$

EXO-200 @ WIPP

liquid Xenon 200 kg (80% enrichment)



ionization + scintillation
 $\sigma/E=1.4\%$ @ $Q_{\beta\beta}$

**sensitivity ~150 meV
 (2 years)**

external ^{208}Tl γ limited

$T_{1/2} > 10^{22} \text{y} \rightarrow T_{1/2} = (2.11 \pm 0.04 \pm 0.21) \times 10^{21} \text{y}$
 DAMA EXO

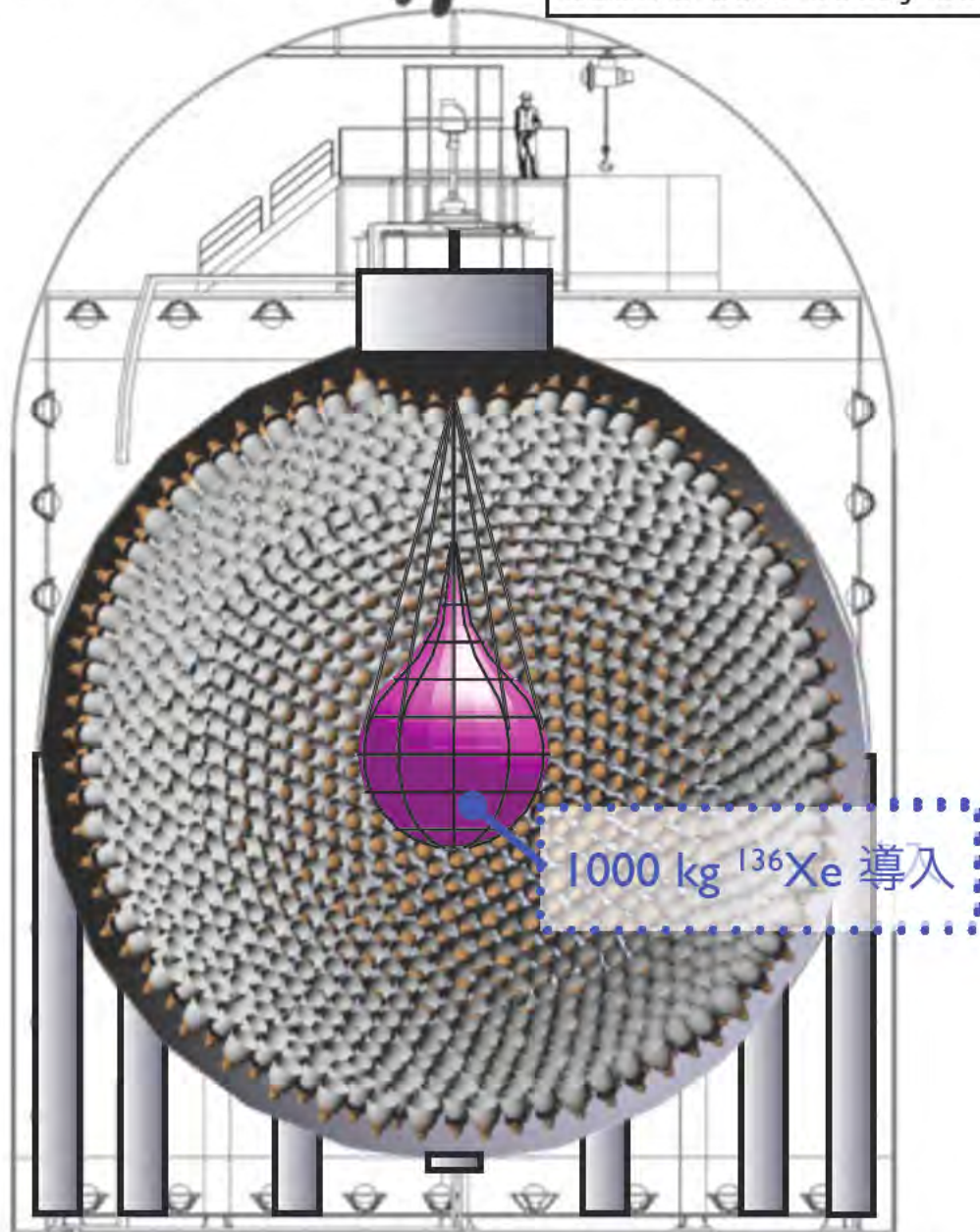
63kg fid. vol.

200kg $\times$ 80% ^{136}Xe detector is running!

KamLAND2-Zen

カムランド 裸

Zero Neutrino
double beta decay search



1000 kg ^{136}Xe 導入

カムランドを使うメリット

- 超純液体シンチレータと半径9mにおよぶアクティブシールドで極低放射能環境を実現済み。（通常の1兆倍）

U: $<3.5 \times 10^{-18}$ g/g, Th: $<5.2 \times 10^{-17}$ g/g

- ほぼ無改造で二重ベータ崩壊核を導入できるため低コストで高感度が実現できる。（410kg 納入済み、もうすぐ開始）

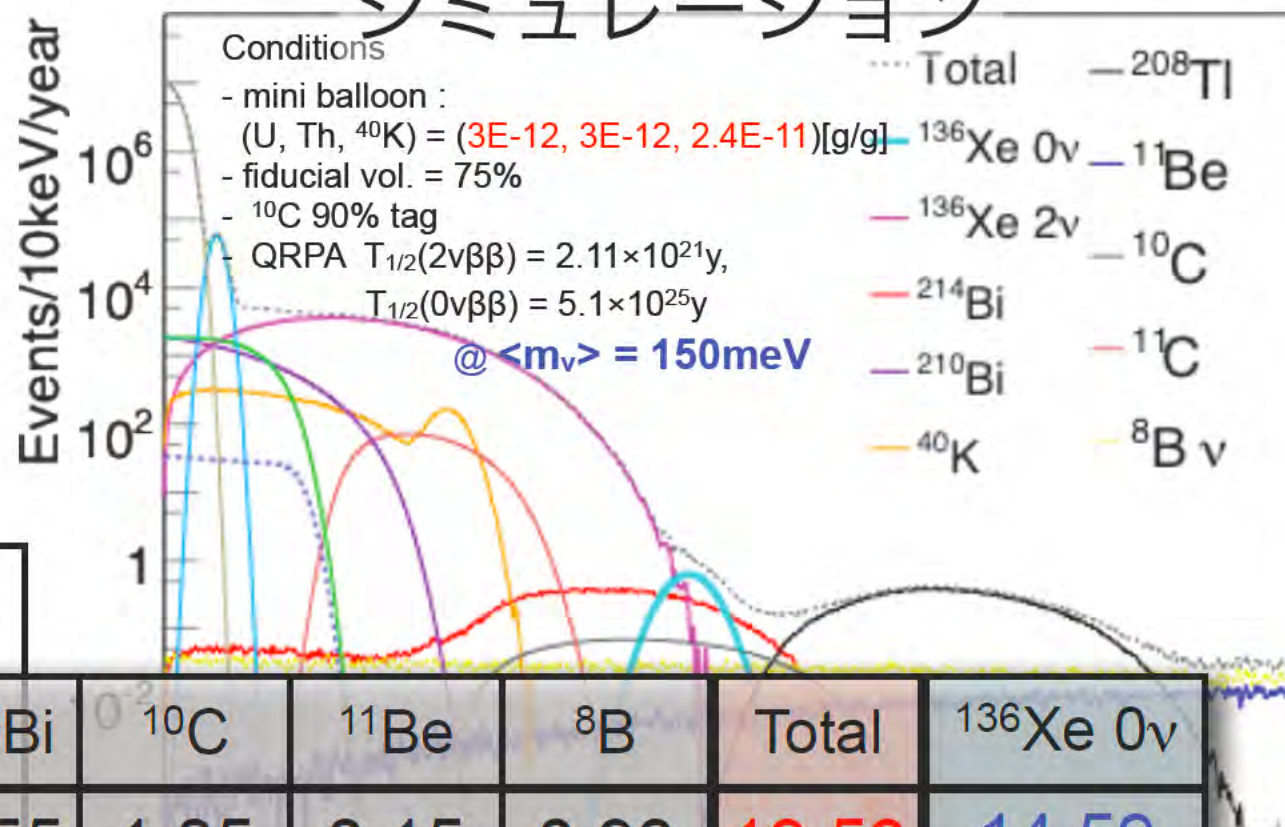
~80 meV in 2 year

~60 meV in 5 year （縮退構造を検証）

- 原子炉・地球ニュートリノ研究も継続できる。
- 高いスケーラビリティ：1000kg, 10tonも可、集光ミラーや高効率液体シンチレータで、さらなる高感度化。（高圧？）

~20 meV in 5 years （逆階層構造を検証）

シミュレーション



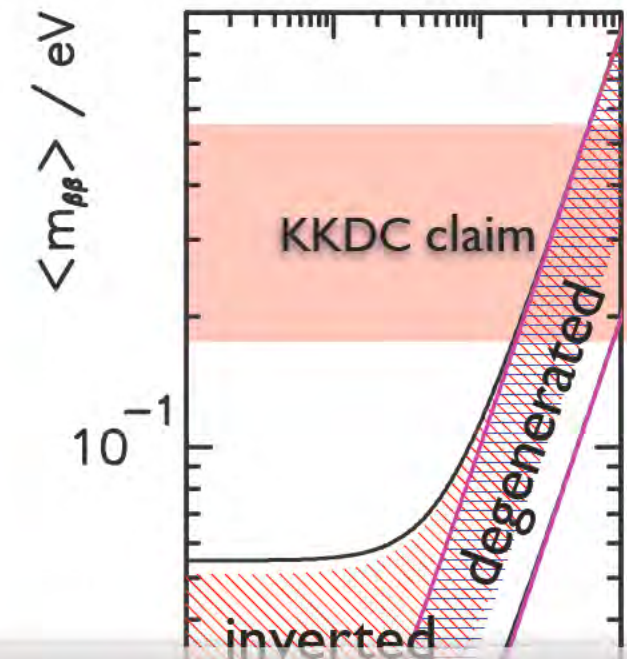
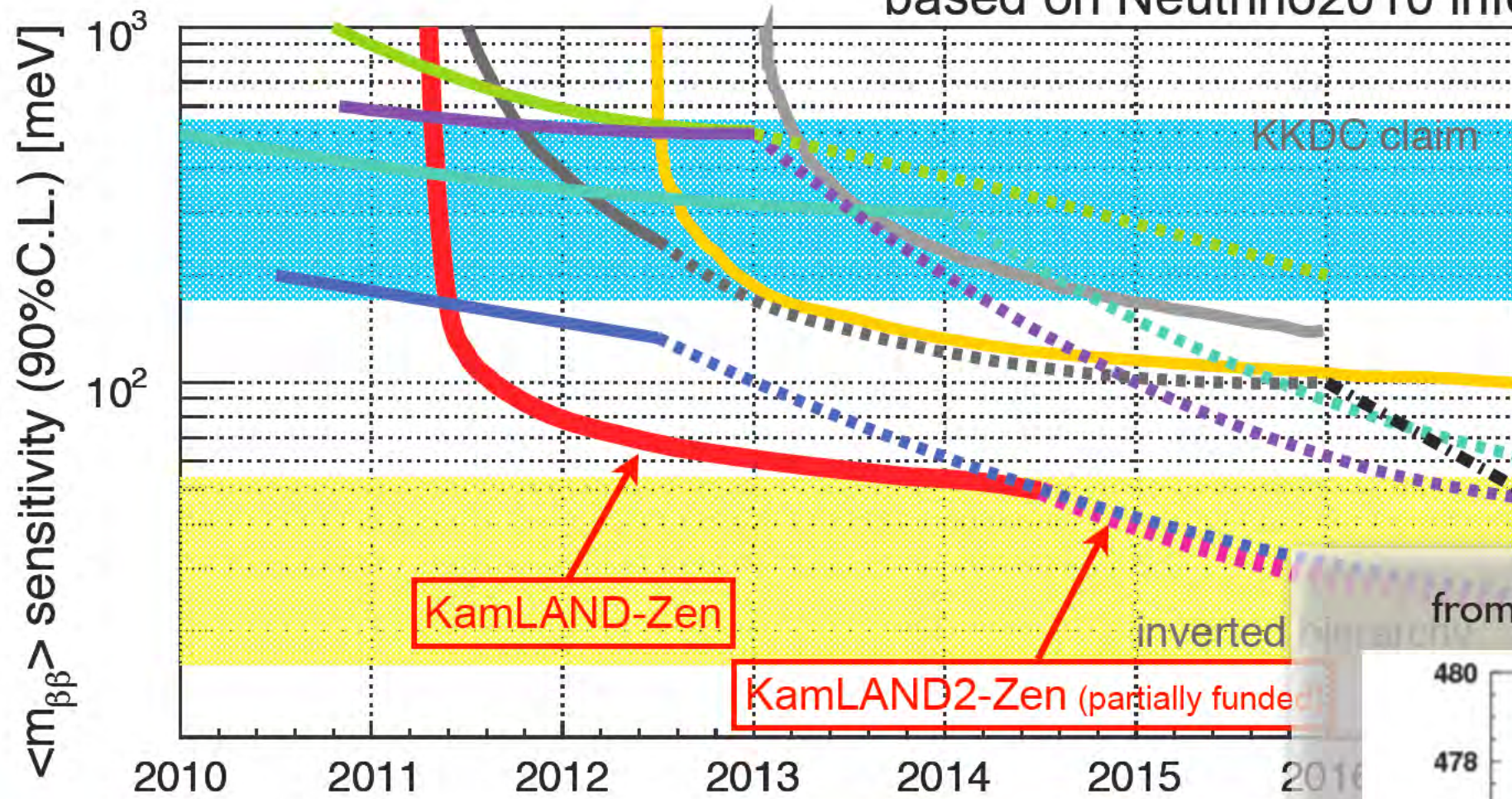
キセノンを使うメリット

- 同位体濃縮、純化手法が確立している。
- シンチレータに3%以上可溶で回収率が高い。
- $2\nu 2\beta$ の半減期が比較的長く、分解能への要求が低い。

$^{136}\text{Xe } 2\nu$	^{208}Tl	^{214}Bi	^{10}C	^{11}Be	^8B	Total	$^{136}\text{Xe } 0\nu$
8.55	6.97×10^{-3}	8.55	1.85	0.15	0.93	19.53	14.59
± 0.67	$\pm 0.93 \times 10^{-3}$	± 0.06	± 0.01	± 0.01	± 0.02	± 0.67	± 0.02

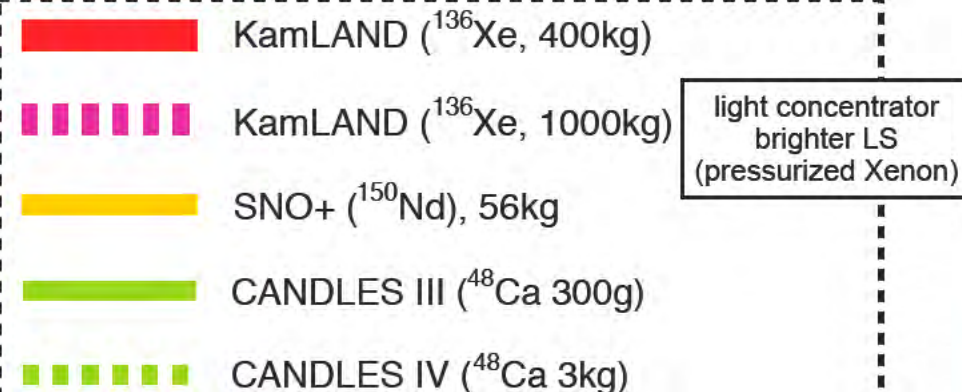
Expected sensitivity of KamLAND-Zen

based on Neutrino2010 info.

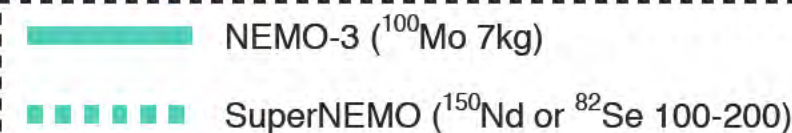


from Y.Takeuchi neutrino 2010

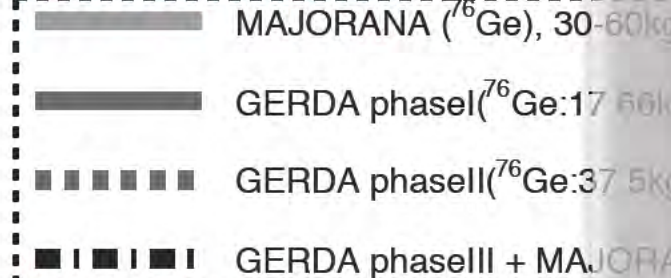
Scintillator



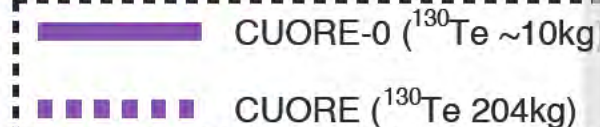
Tracking



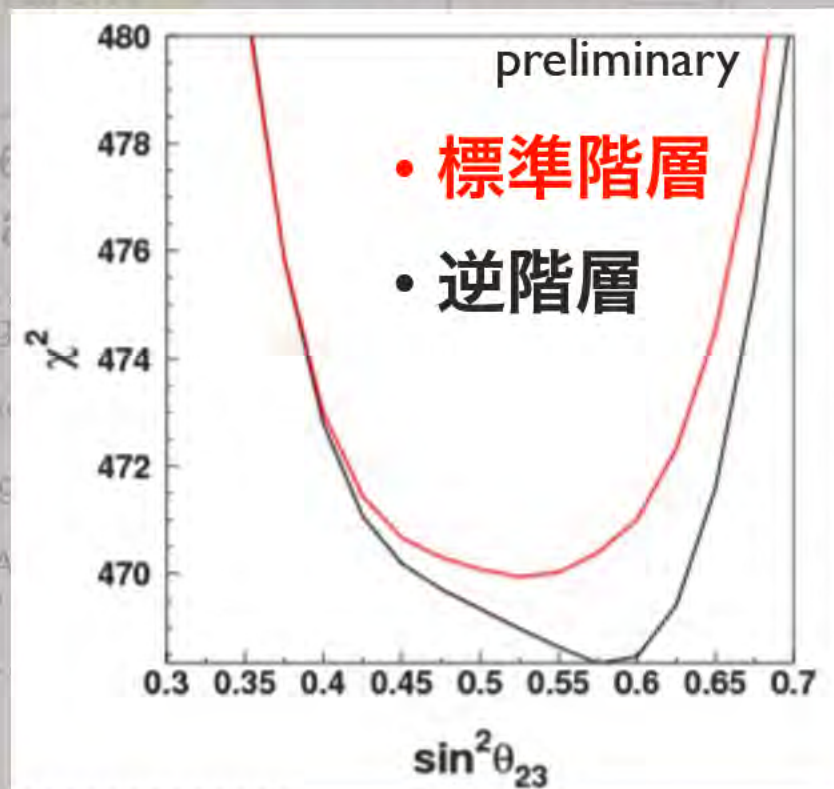
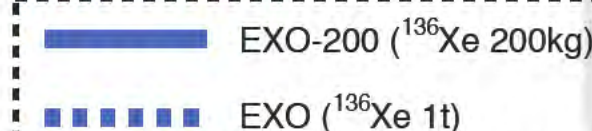
Semi-Conductor



Bolometer



Liquid TPC



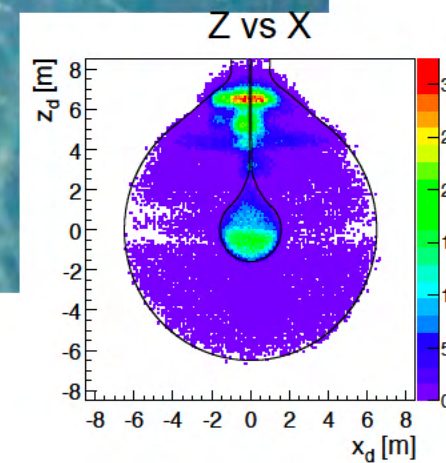
SK大気ニュートリノデータは
逆階層を少し好んでいる！



スーパークリーンルーム（クラス1）
でのミニバルーン製作



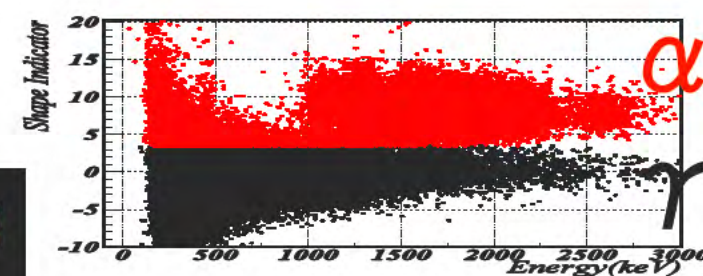
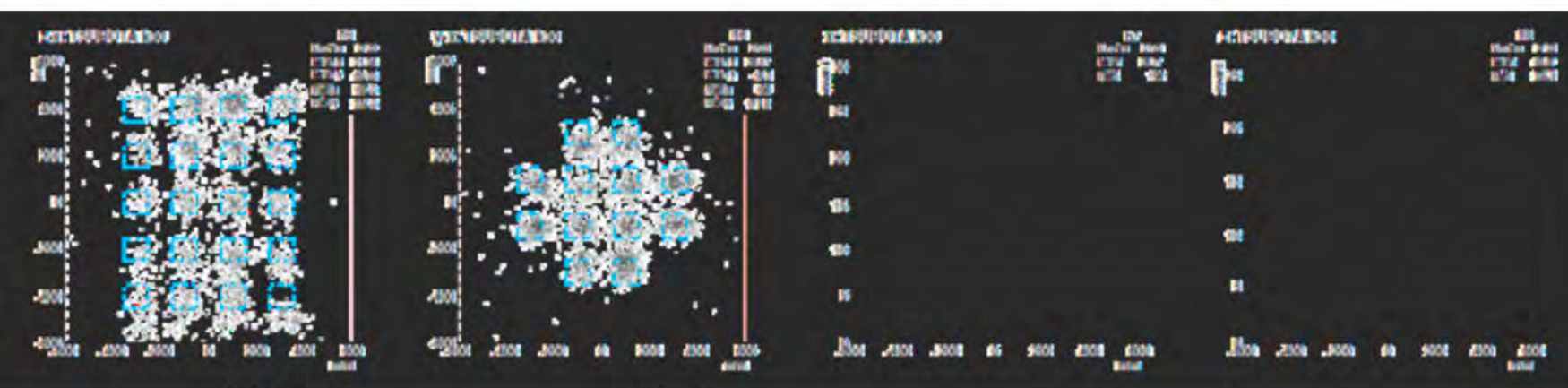
ミニバルーンのカムランドへの導入



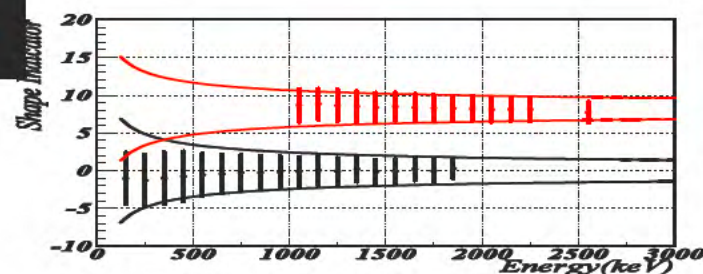
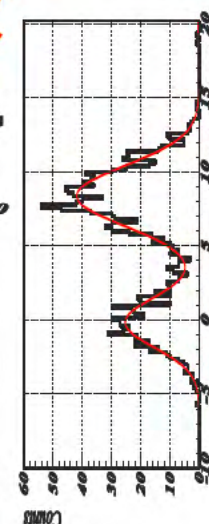
CANDLES III (about to start)

CaF₂ シンチレータ結晶

^{48}Ca
 $Q=4.27\text{MeV}$

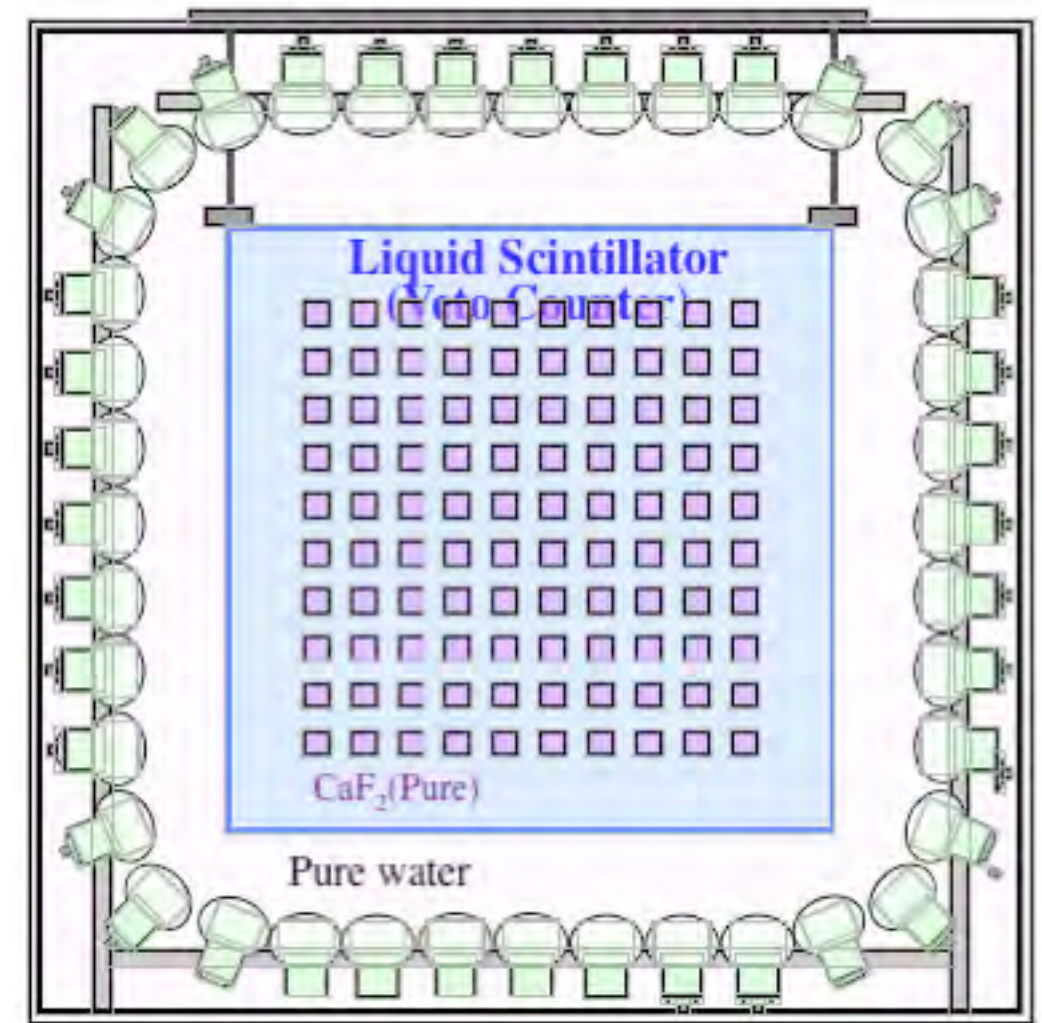
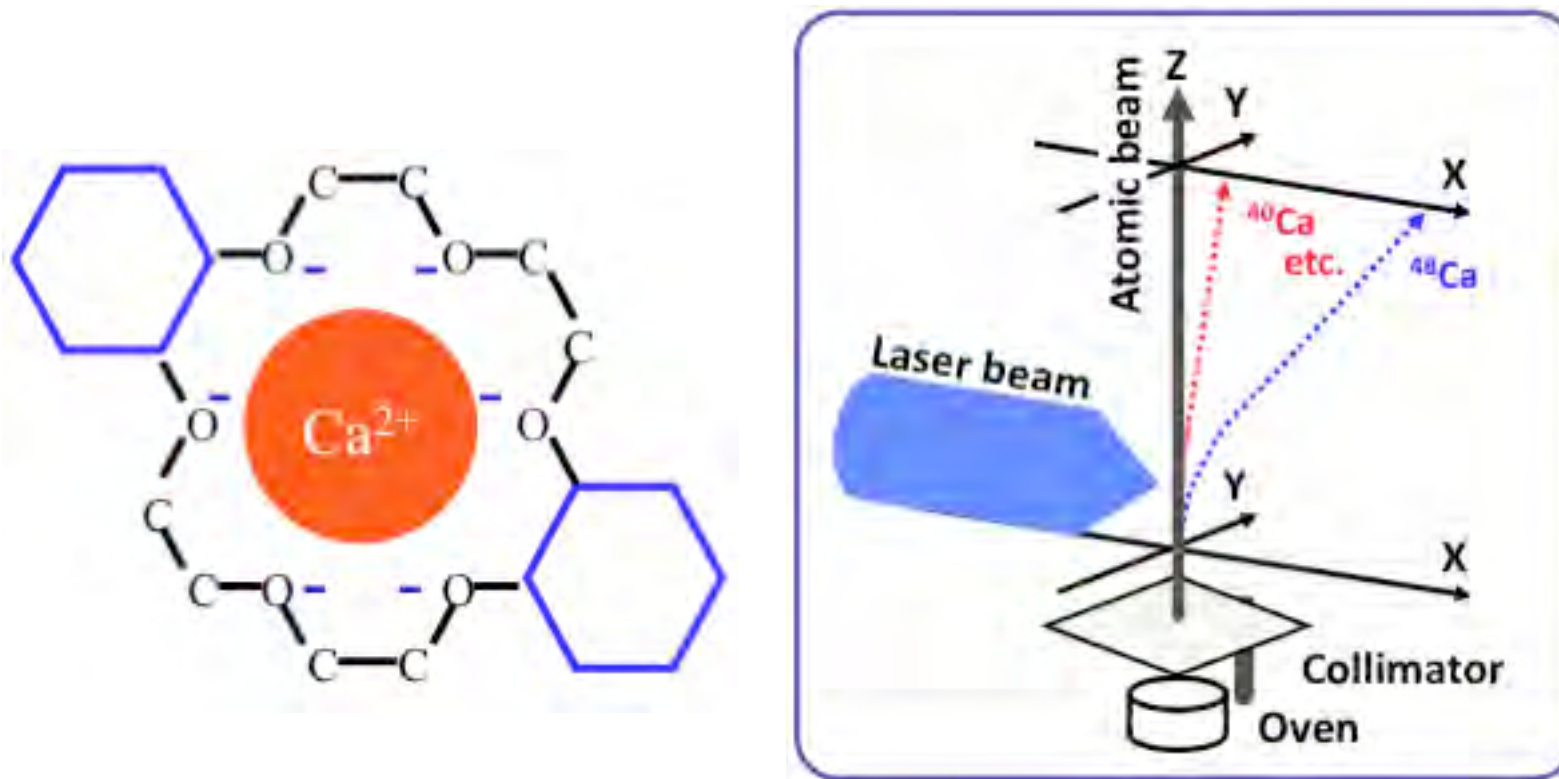


PSD 可能



CANDLES IV

0.2%しかない自然存在比だが、
クラウンエーテルでの濃縮やレーザー
を使った濃縮の開発が進んでいる。



ボロメータ化の案もあり

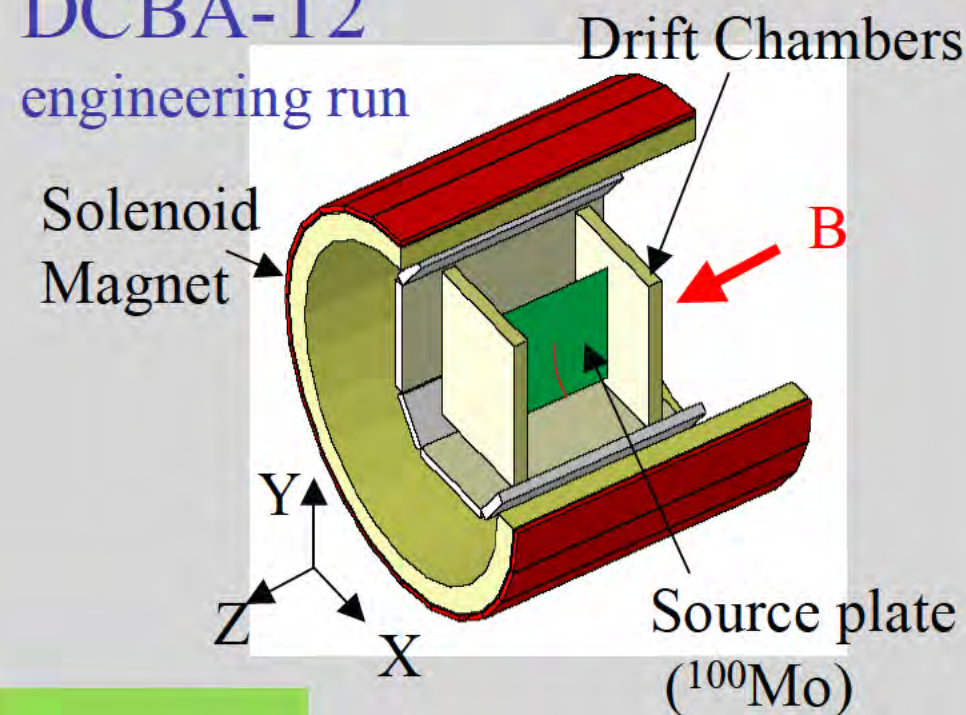
CANDLES III (305kg), IV(3.4t→3.3kg ^{48}Ca), V(10t 1% → 30t 5%)

目標感度 10 meV?

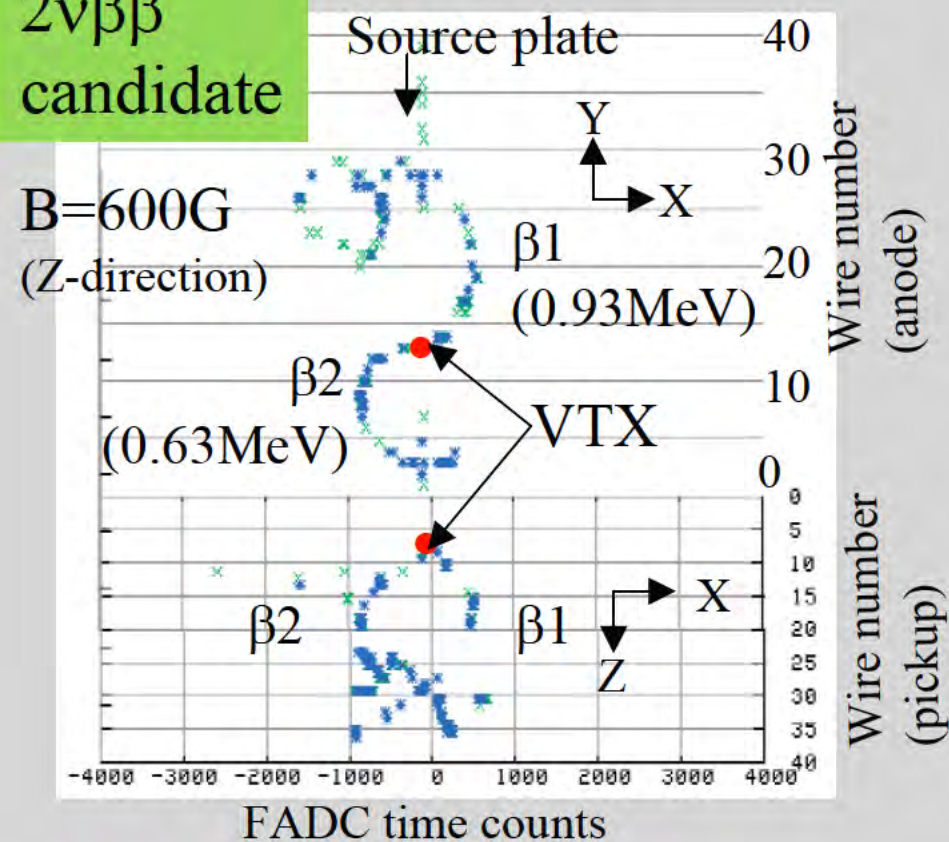
Drift Chamber Beta Ray Analyser

DCBA Experiment

DCBA-T2 engineering run

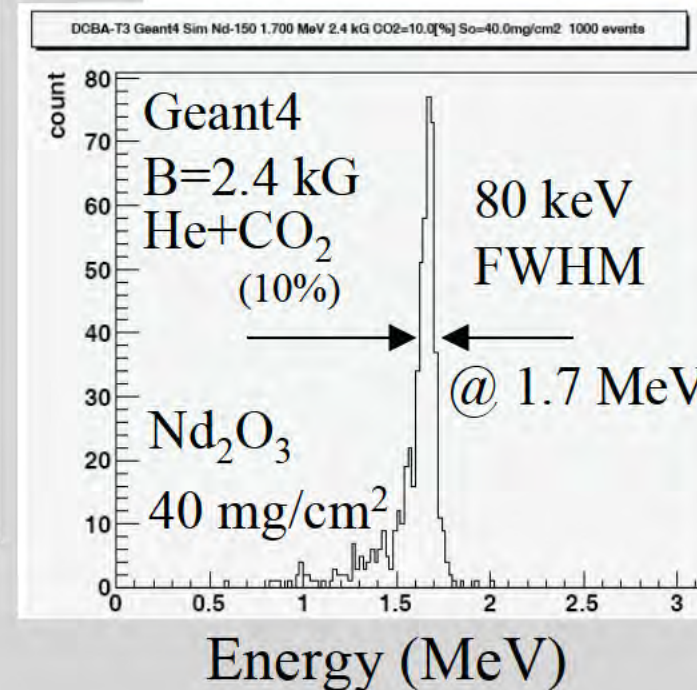
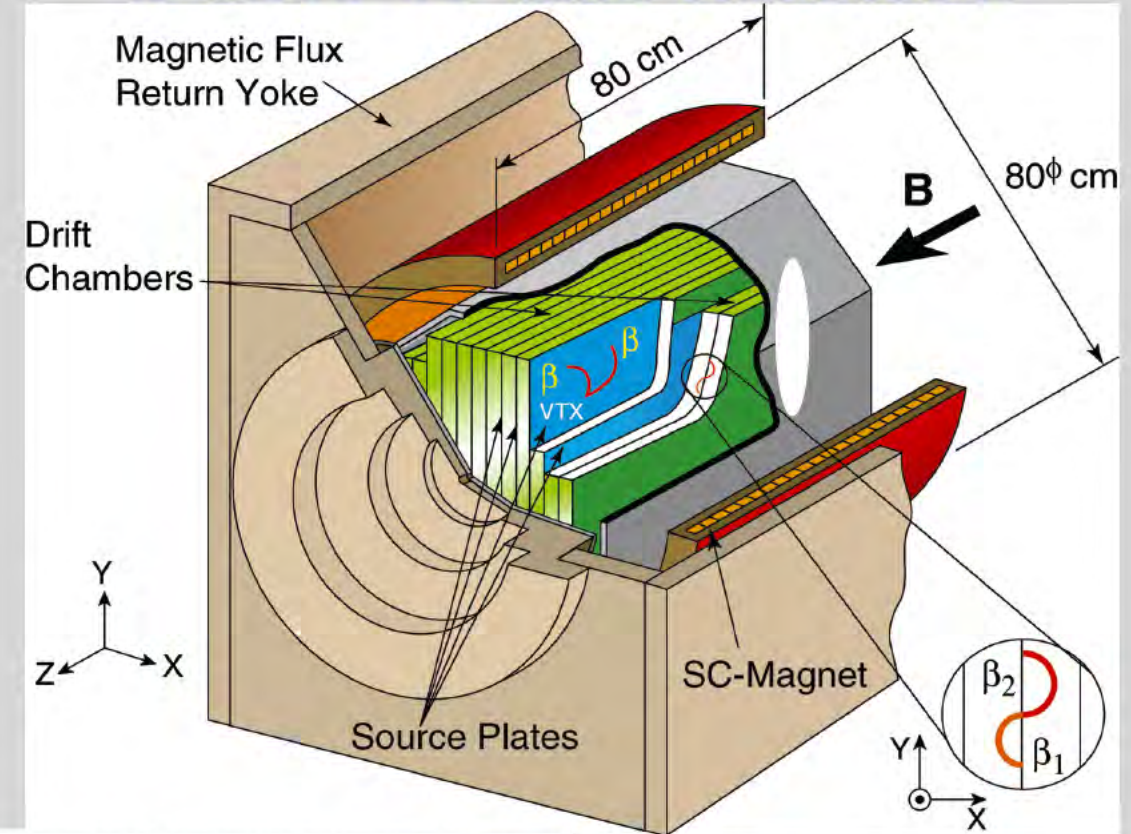


$2\nu\beta\beta$
candidate



角分布を測定

DCBA-T3 under construction

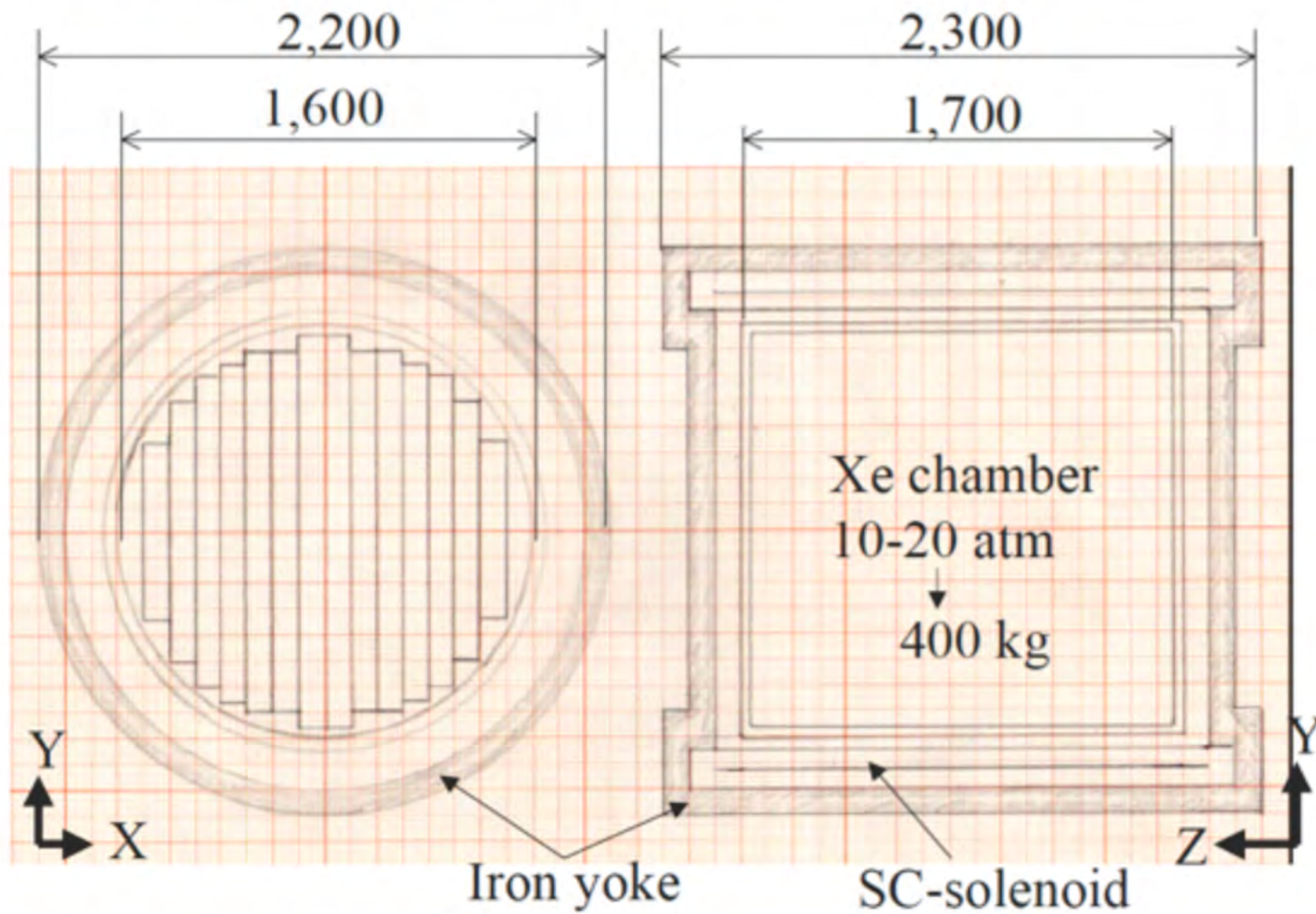


Corresponding
 $\Delta E/E$
=3.4% (FWHM)
at Q of ^{150}Nd
(=3.37 MeV)

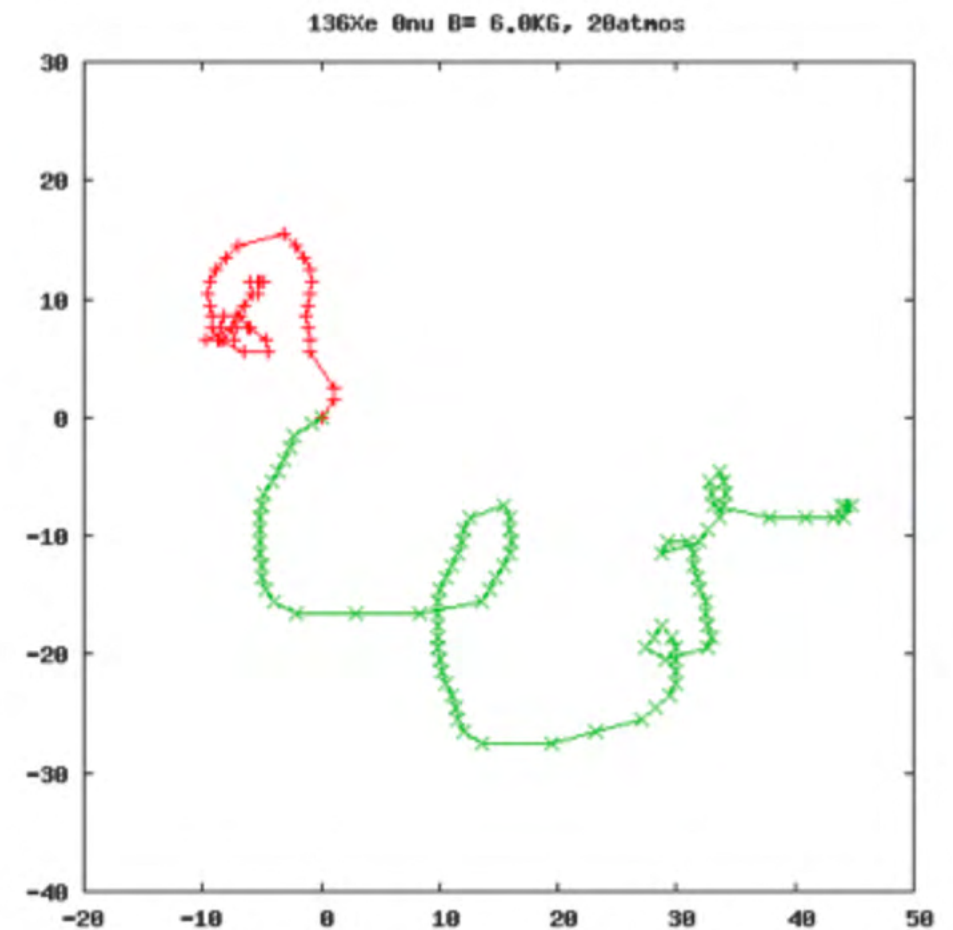
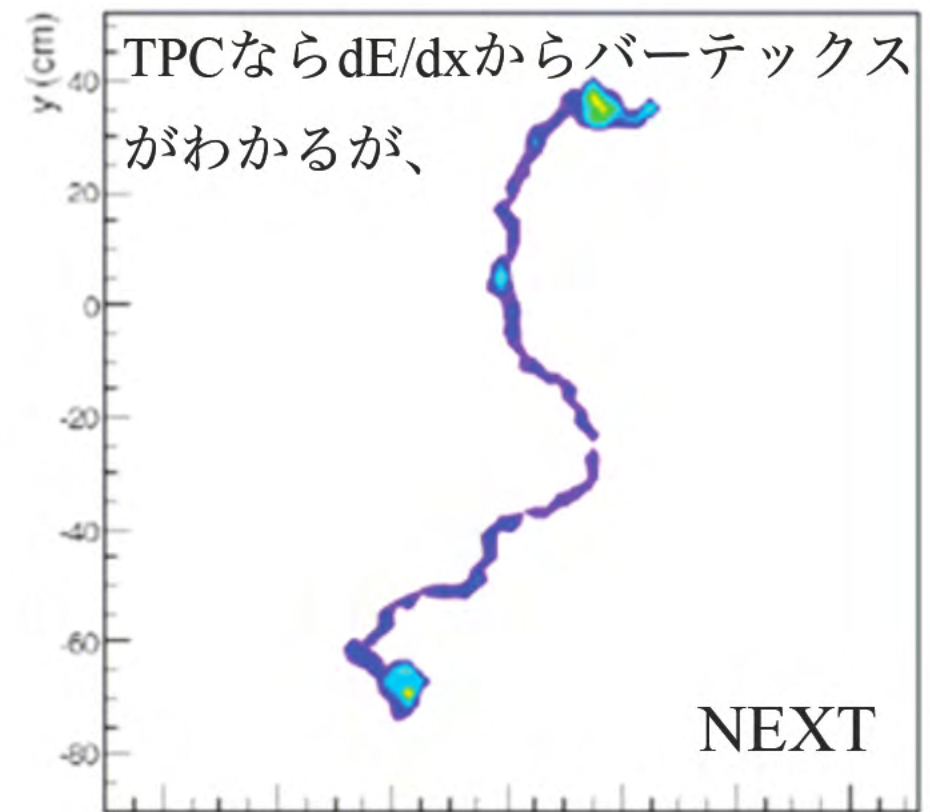
Plots courtesy of
DCBA collaboration

キセノンガス利用の可能性

Conceptual design of XeMTD

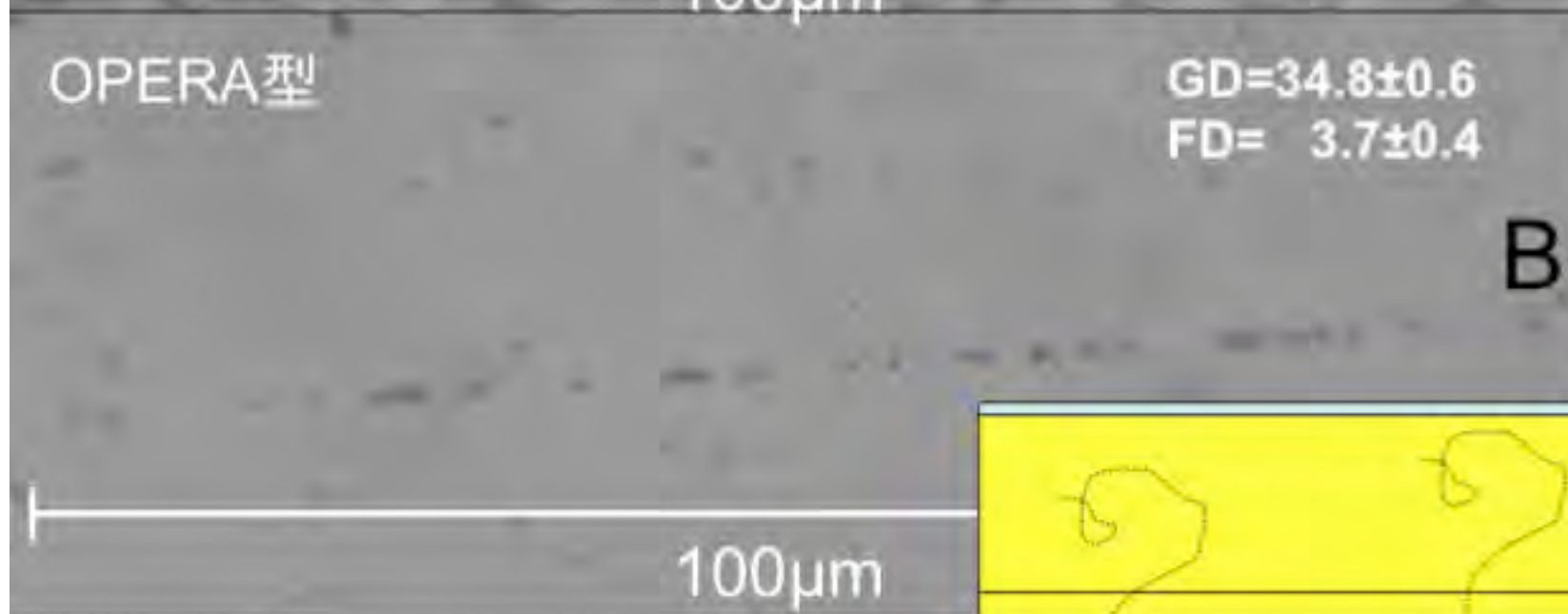


Ishihara @DBKK2010

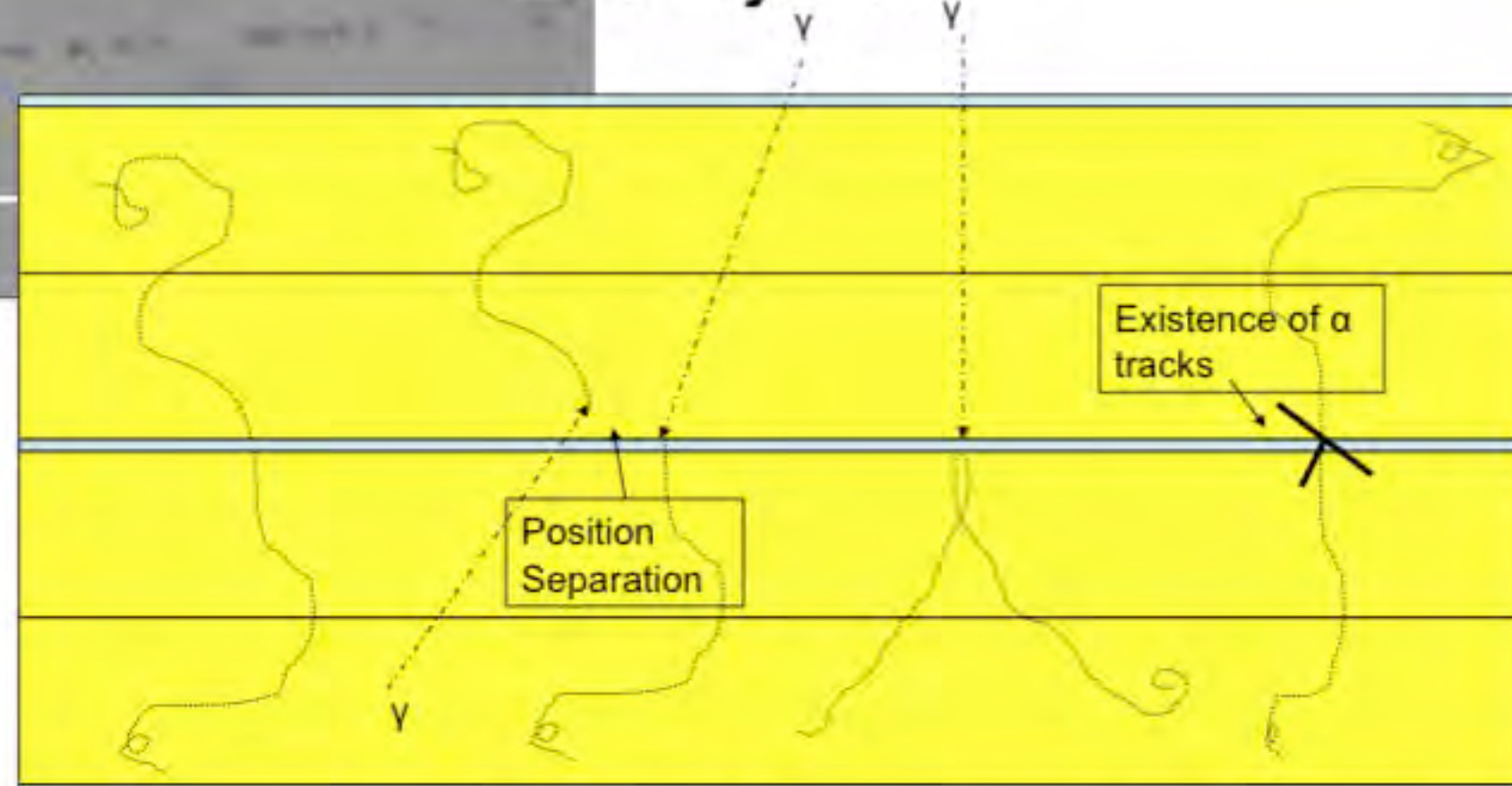


新乳剤(高銀・Na型)最小電離粒子飛跡 $GD=80.4\pm4.5$ (30分現像)
 $FD=7.3\pm2.2$

エマルジョン 名古屋大



BG rejection



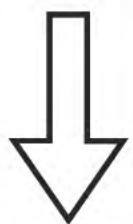
$2\nu 2\beta$
Measure
energy
of electrons

Chance coincidence of
Compton events or
internal sources as ^{40}K

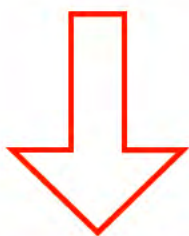
e-pair, knock-on
Estimate from the
emulsion event.

Beta from
Th U chain

Kamiokande



KamLAND-Zen



アイデア次第で新たな
極低放射能科学を推進可能

light concentrator
high light yield LS

2v negligible

imaging device

^{10}C negligible

30m depth → ~15wt%

^8B solar- ν 1/5

KamLAND2

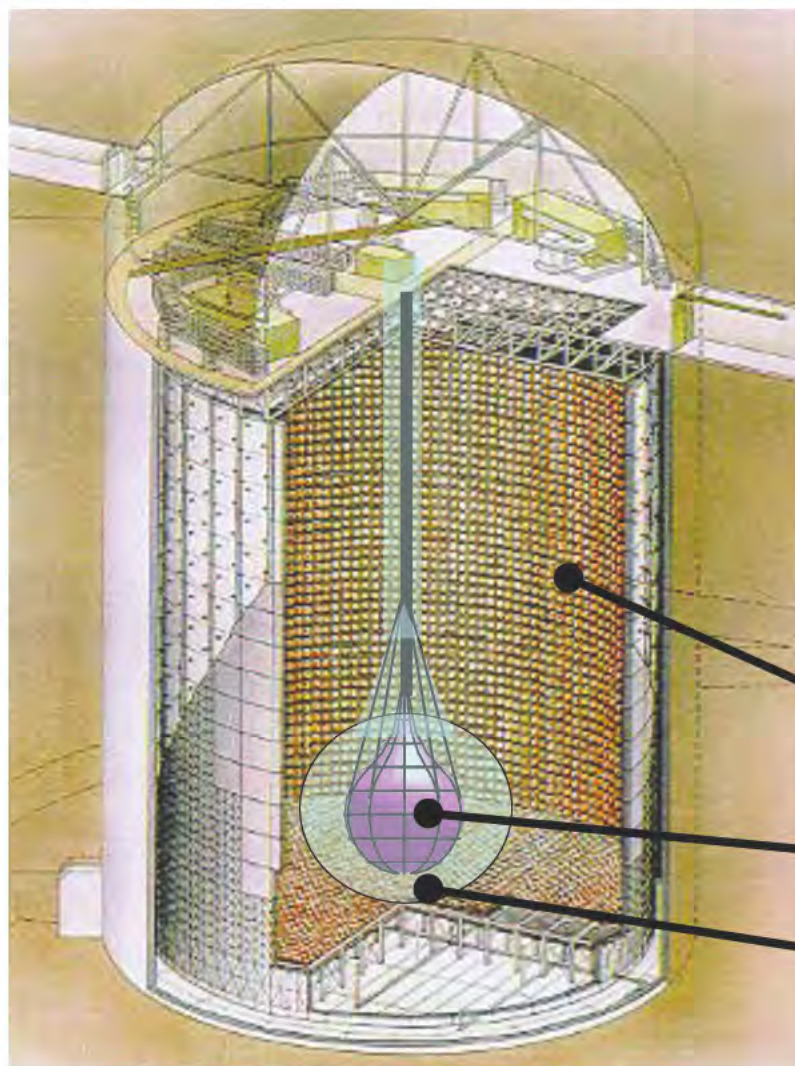
KamLANDi

Super-Kamiokande

歴史は繰り返すか？

Super-KamLAND-Zen

Hyper-Kamiokande



>10,000kg enriched ^{136}Xe

~8meV is possible.

正常階層構造に切り込む！

water

Xenon-LS

normal LS

さいごに

- 地下素粒子実験は極低放射能環境を必要とする研究が活発で、暗黒物質探索やニュートリノレス2重ベータ崩壊探索での大きな展開が期待できる。
- まずは熟成した技術で「発見」をめざす、同時に新たな発見で機敏に展開できるよう多様な技術開発を支援する。大型化・高精度化に向けてはコミュニティーの協調とオール日本や国際的な体制が必要となる。
- 同時に既存の資産は新たな地下素粒子研究への有効活用が望まれる。

「地下素粒子実験」

ダークマターの信号が直接探索により見つかった場合、更なる確証を得ると共に、LHCや宇宙観測などの結果と照合してその背後の新物理を探るべきである。そのため、数トンスケールでの季節変動観測や反跳スペクトルの高精度測定が必要である。また、スピン依存性や原子数が異なる原子核を用いた観測も重要となる。ダークマターの運動方向が観測可能な大型実験の実現も検討していく。

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊が発見されたなら、ニュートリノ有効質量の精度向上のために、複数核種での寿命測定と行列要素測定による理論的不定性の低減が重要となる。同時に、背後にある物理を究明するために、個々の寿命測定の更なる高精度化と、角度分布が測定可能な大型実験を検討していく。