

# $0\nu 2\beta$ 研究の将来展望

井上邦雄

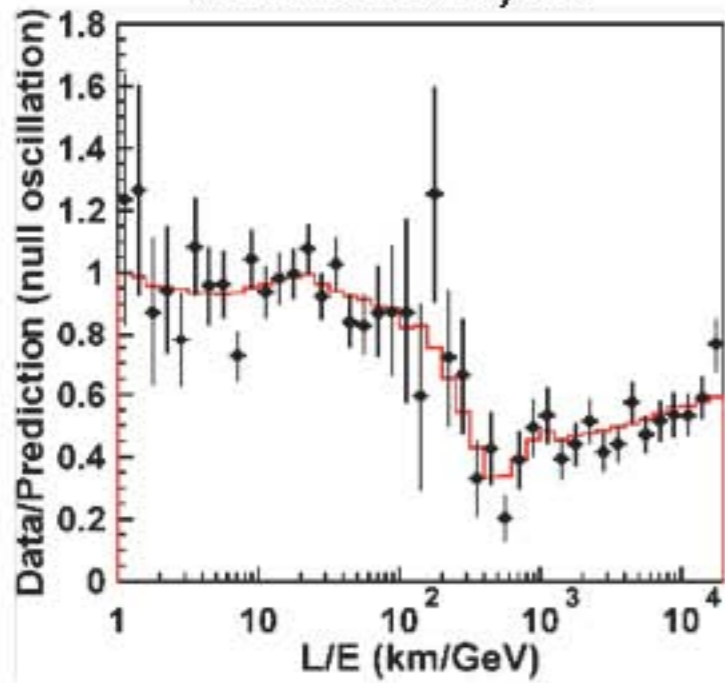
東北大学ニュートリノ科学研究センター

2011年7月29日 東京大学IPMU大講義室

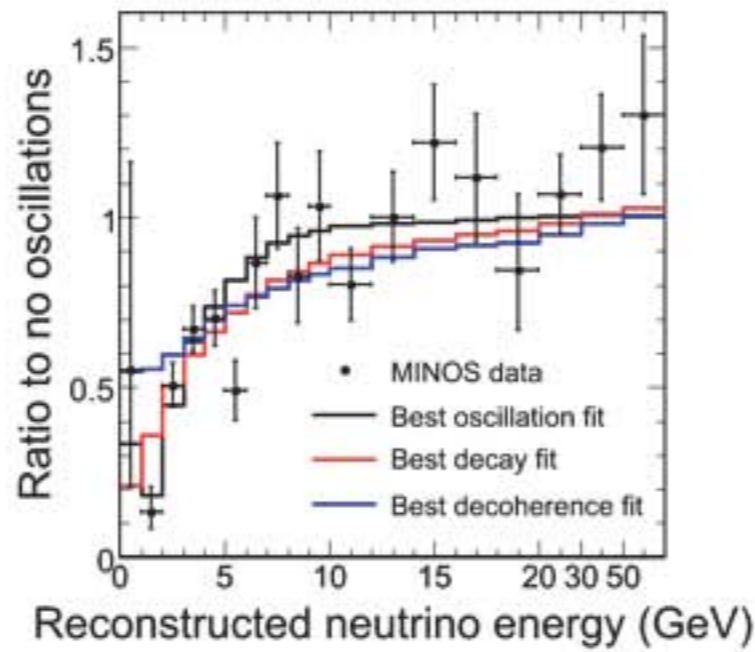
# はじめに

- 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、二重 $\beta$ 崩壊を主題とする。
- 一つに集約することが必須な規模ではなく、個性に富んだ複数の手法が共存できる。大学の独自性や得意な技術を発揮でき、学生にアピールしやすい。
- とはいえ、大きな流れは共有したい。

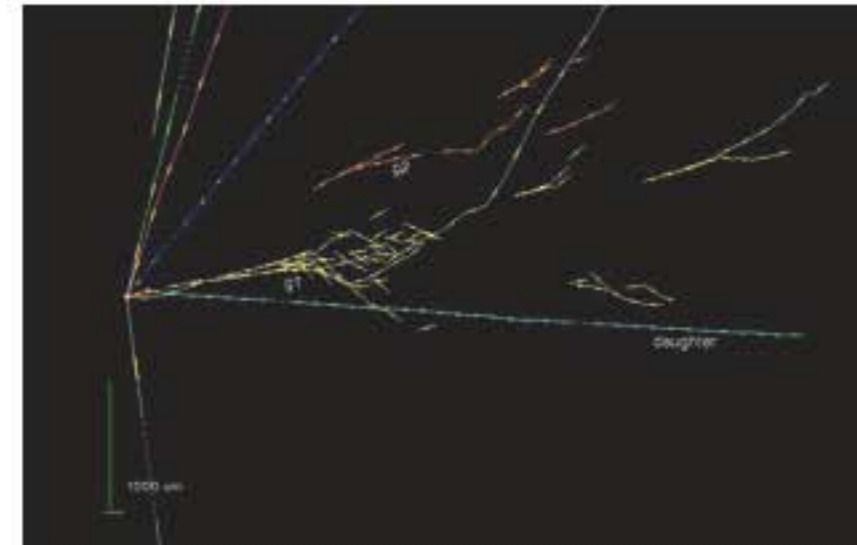
SK atm 1/2 cycle



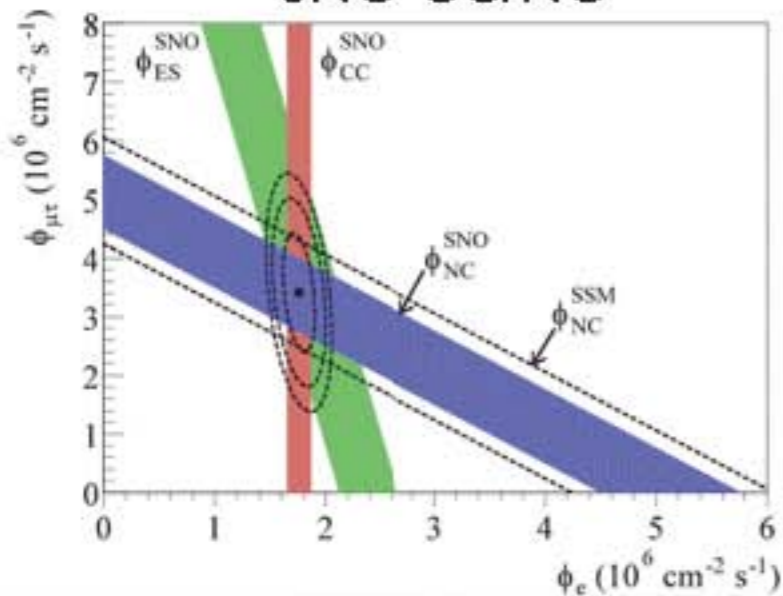
MINOS 1/2 cycle



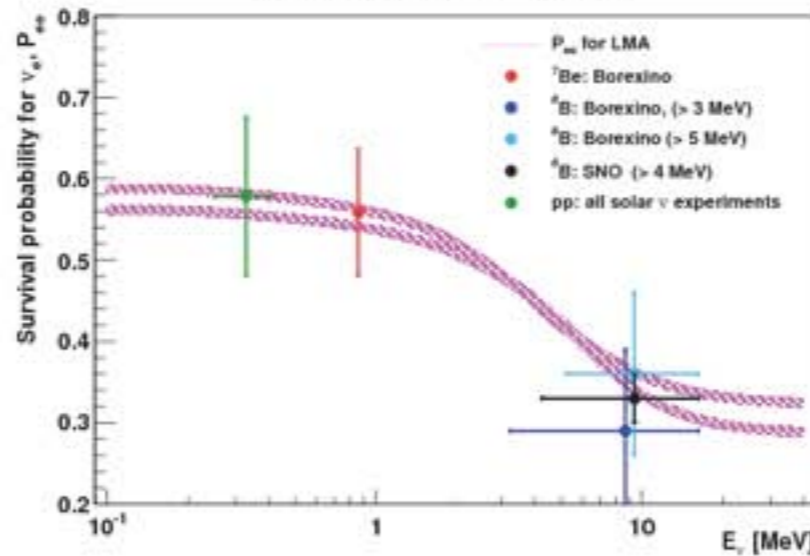
OPERA  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$



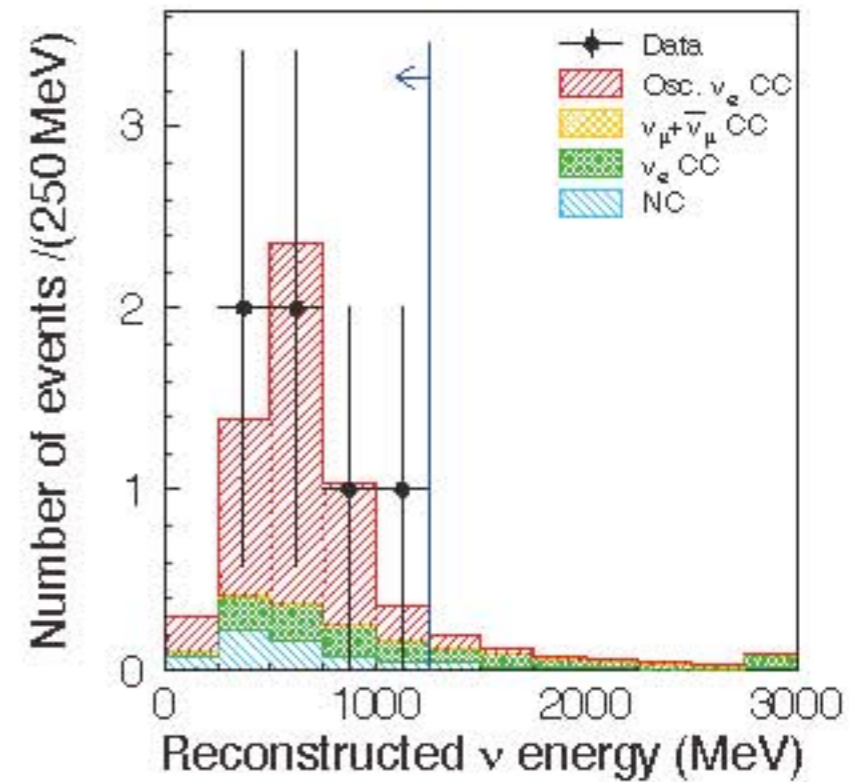
SNO CC/NC



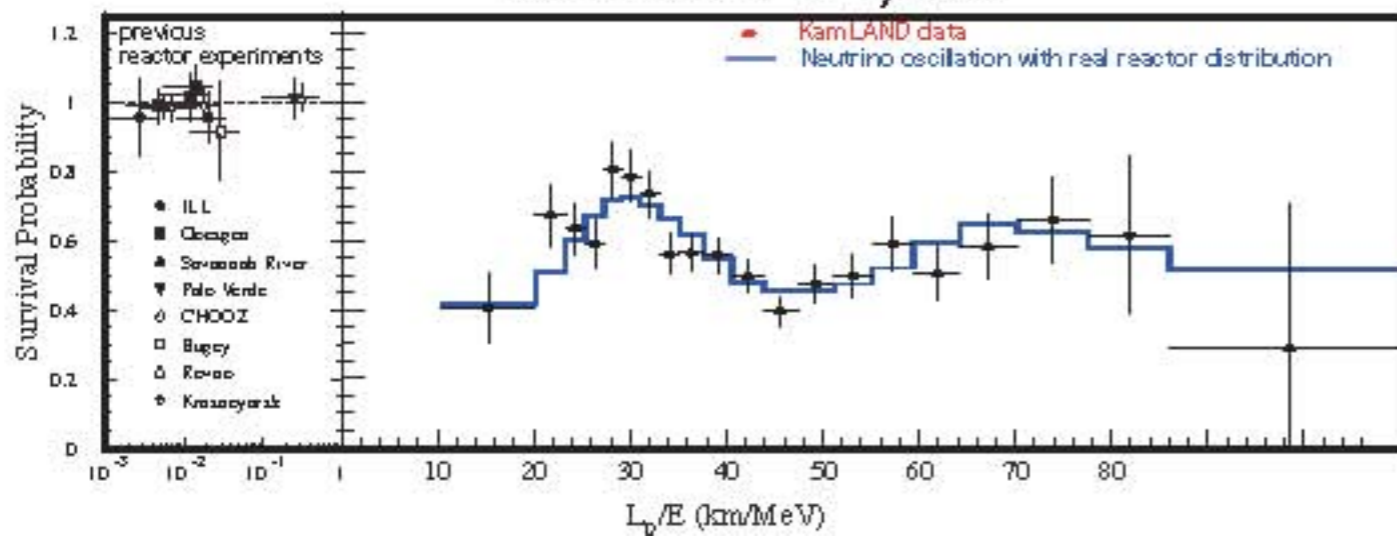
Borexino MSW



T2K  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$



KamLAND 2 cycles



質量の2乗の差

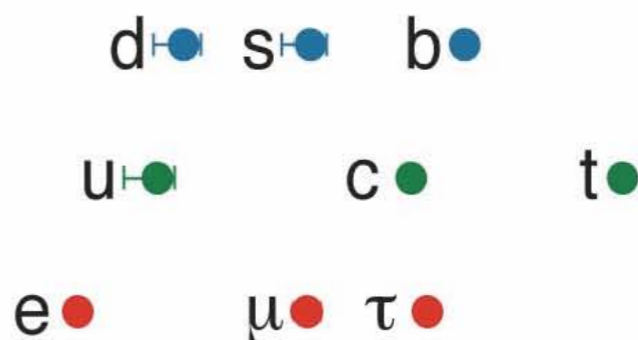
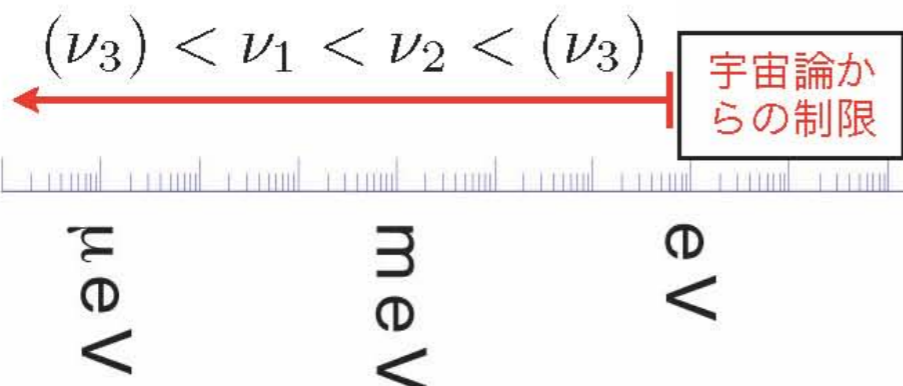
$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \sim 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$$

質量の絶対値は分からない

# 素粒子の質量

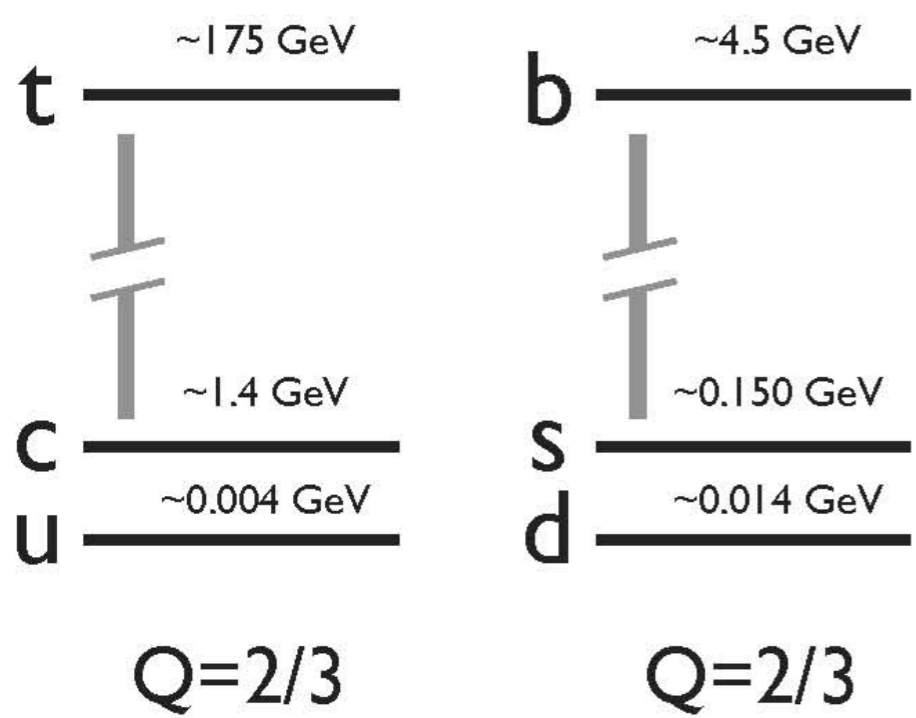
## fermion masses

ニュートリノは突出して軽い

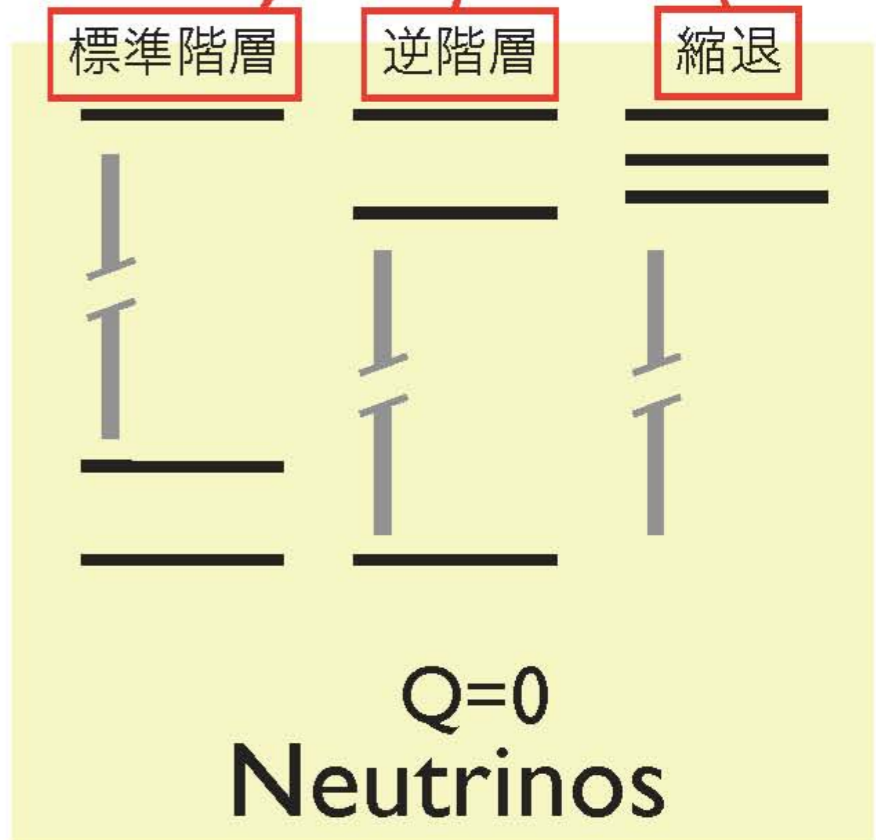
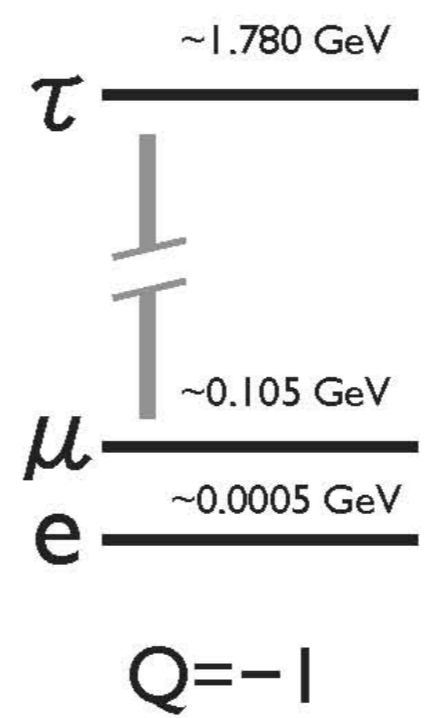


質量の2乗の差が既知なので3種類の質量構造が許される。

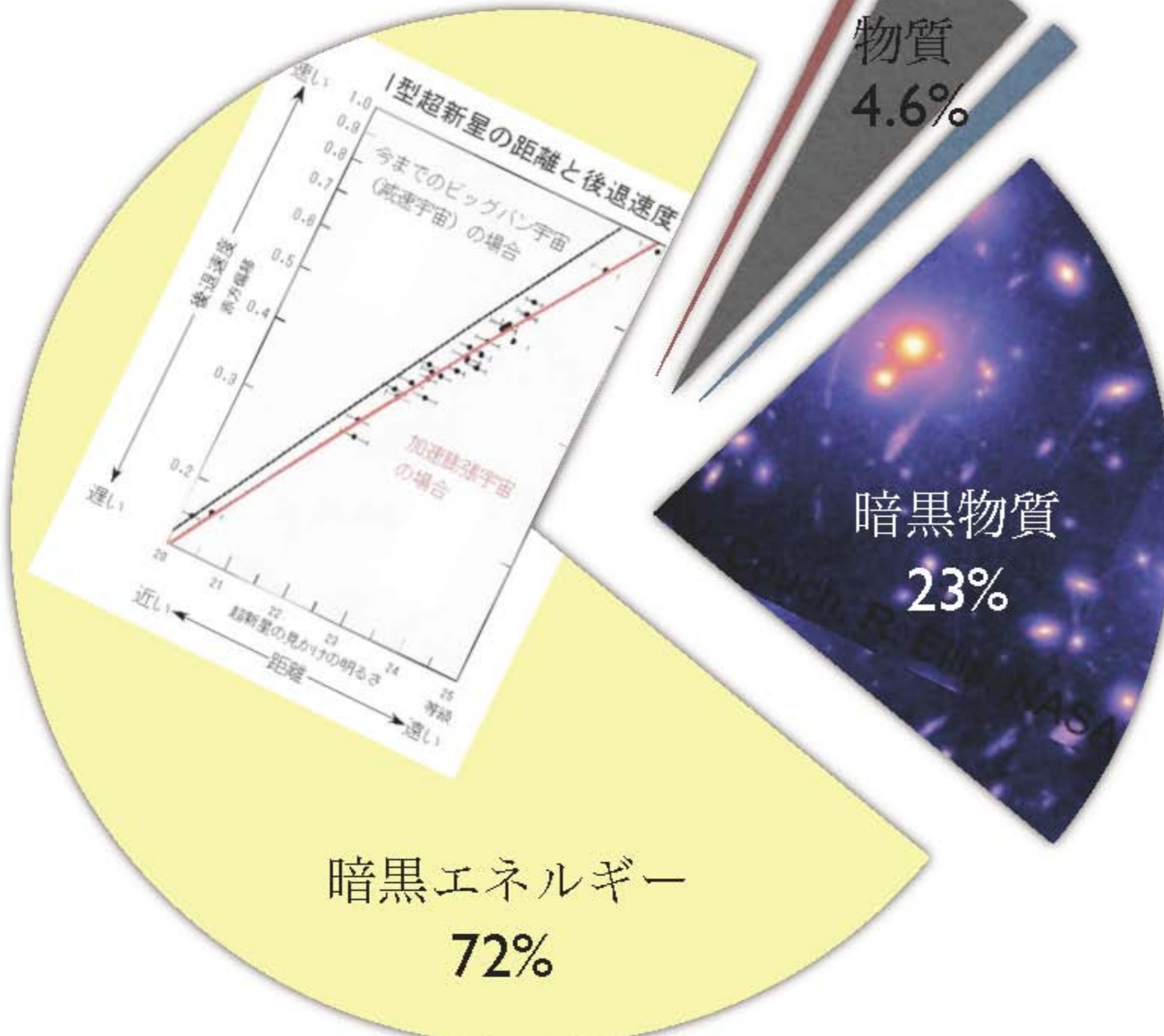
### Quarks



### Leptons



# 現在の宇宙の構成要素



- 星
- バリオン
- ニュートリノ?  
0.1~1%



# 宇宙物質優勢の謎

宇宙開闢

1,000,000,001

1,000,000,000

なぜ非対称なのか？

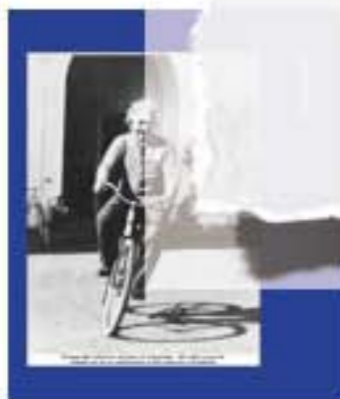
宇宙・素粒子の大きな謎

暗黒物質

暗黒エネルギー

インフレーション

現在



物質

宇宙物質優勢

小さなニュートリノ質量

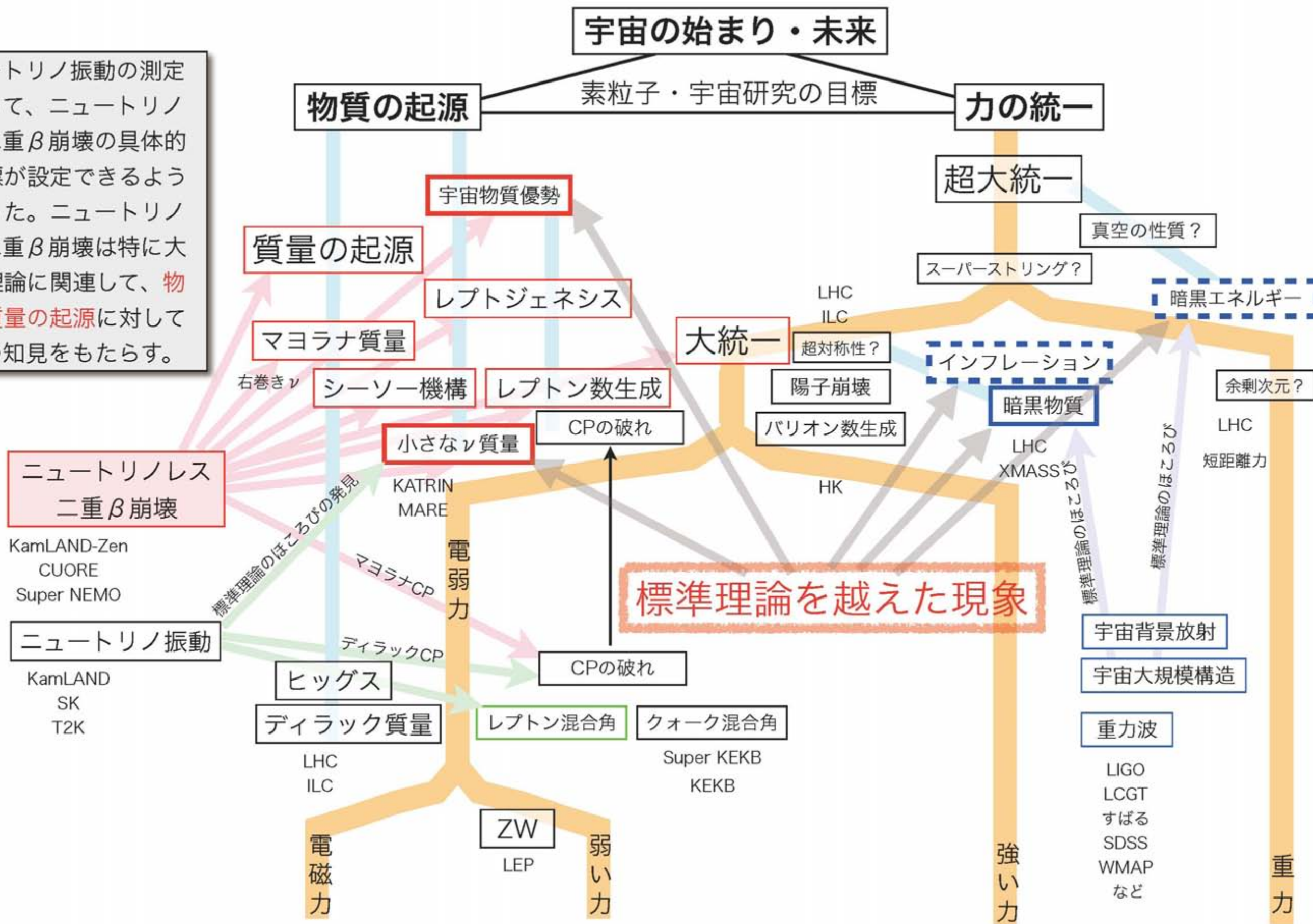
光

なぜ我々物質は生き

残れたのだろうか？

# 地下素粒子研究の位置づけ

ニュートリノ振動の測定によって、ニュートリノレス二重 $\beta$ 崩壊の具体的な目標が設定できるようになった。ニュートリノレス二重 $\beta$ 崩壊は特に大統一理論に関連して、物質・質量の起源に対して多くの知見をもたらす。



物質

粒子でできている

たとえば電子

反物質

反粒子でできている

たとえば陽電子

$e^-$



$e^+$



明らかに別の粒子

中性のニュートリノは？

ニュートリノ

$\nu$

左巻き

反ニュートリノ

$\bar{\nu}$

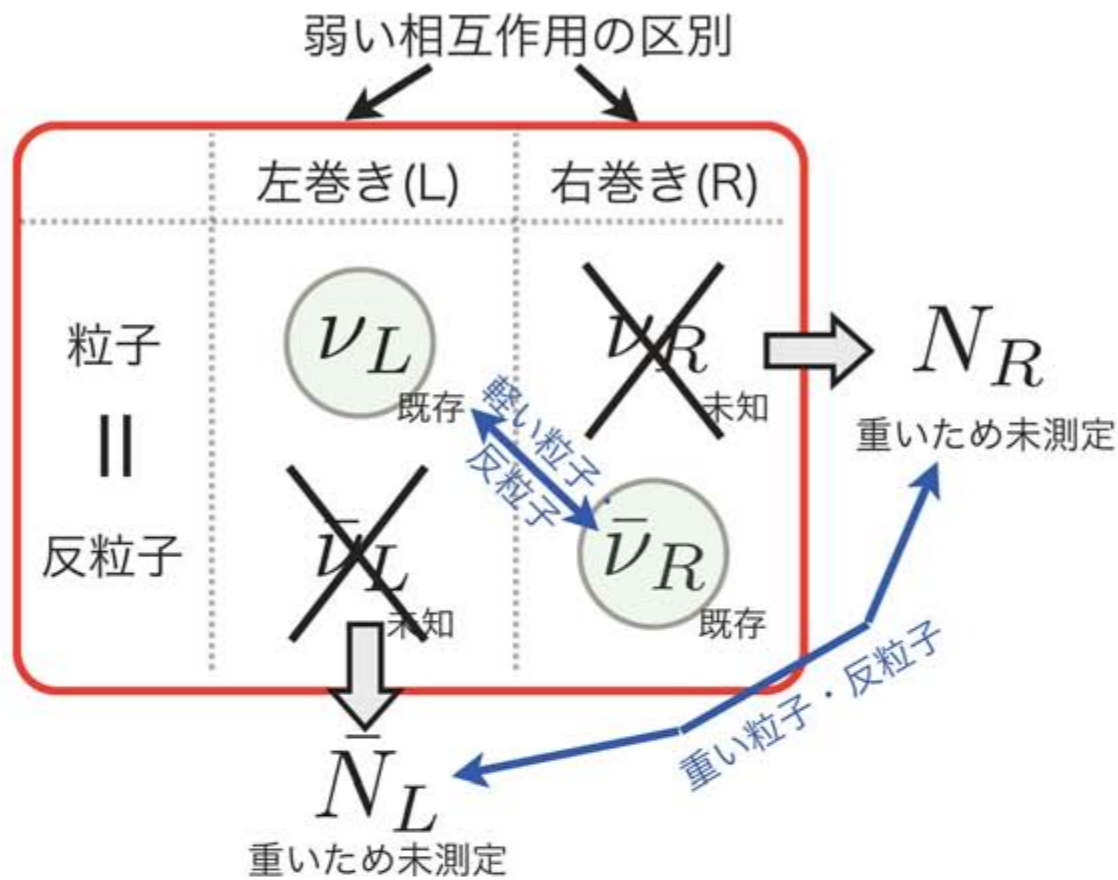
右巻き

(進行方向に対して左回転)

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 vs マヨラナ



ディラックニュートリノ


$\nu \neq \bar{\nu}$  既存と同質量の  $\nu_R$   $\bar{\nu}_L$  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



## 理論の歴史

- 1930 軽い中性粒子 (W.Pauli)
- 1933 ニュートリノ, ベータ崩壊の理論 (E.Fermi)
- 1935 二重ベータ崩壊の理論 (M.Goepfert-Mayer)
- 1937 マヨラナニュートリノの理論 (E.Majorana)
- 1939 ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の理論 (W.Furry)

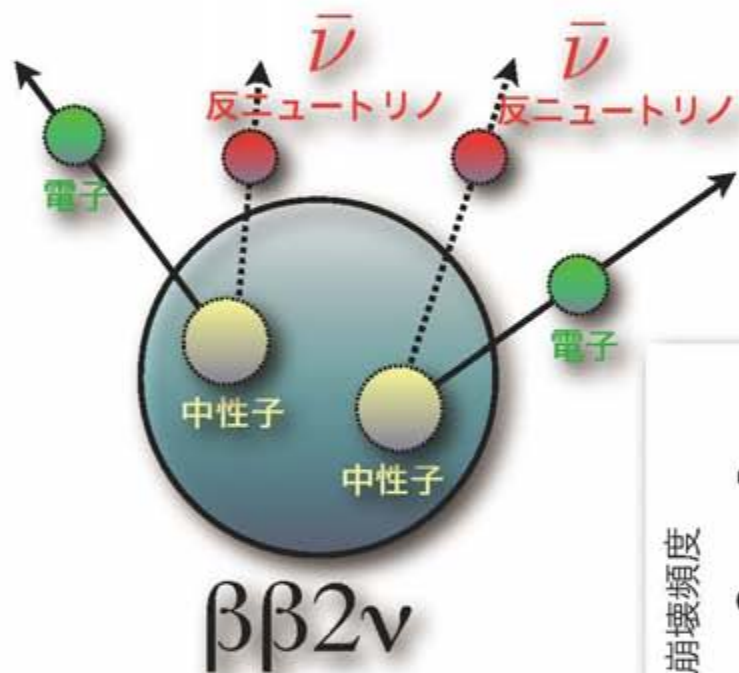
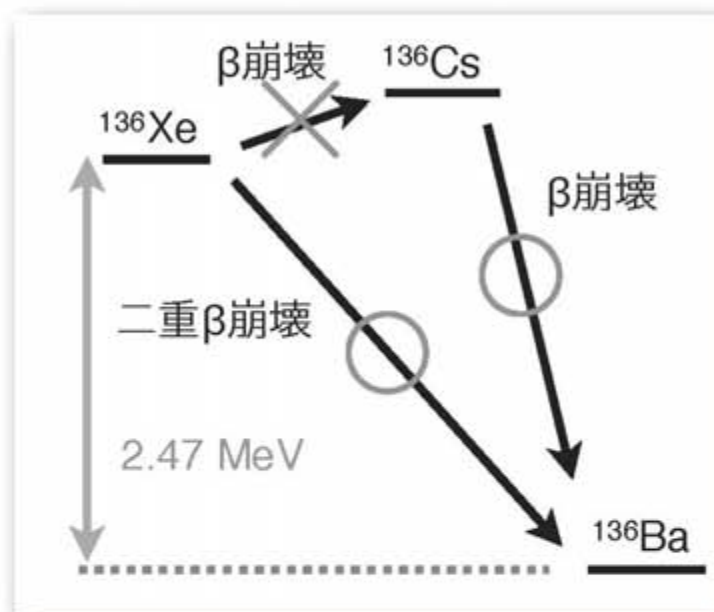


# ニュートリノレス二重β崩壊

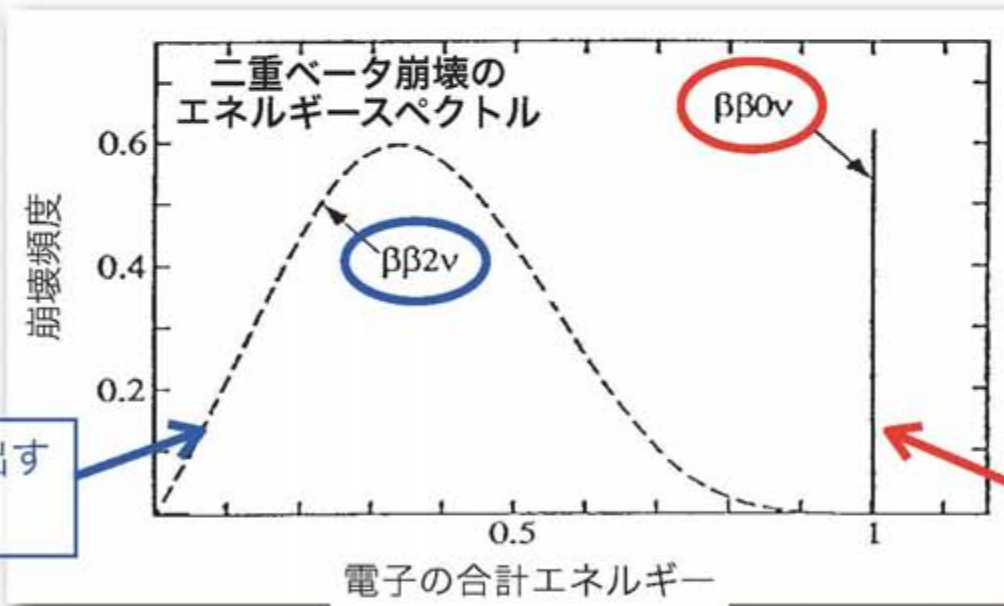
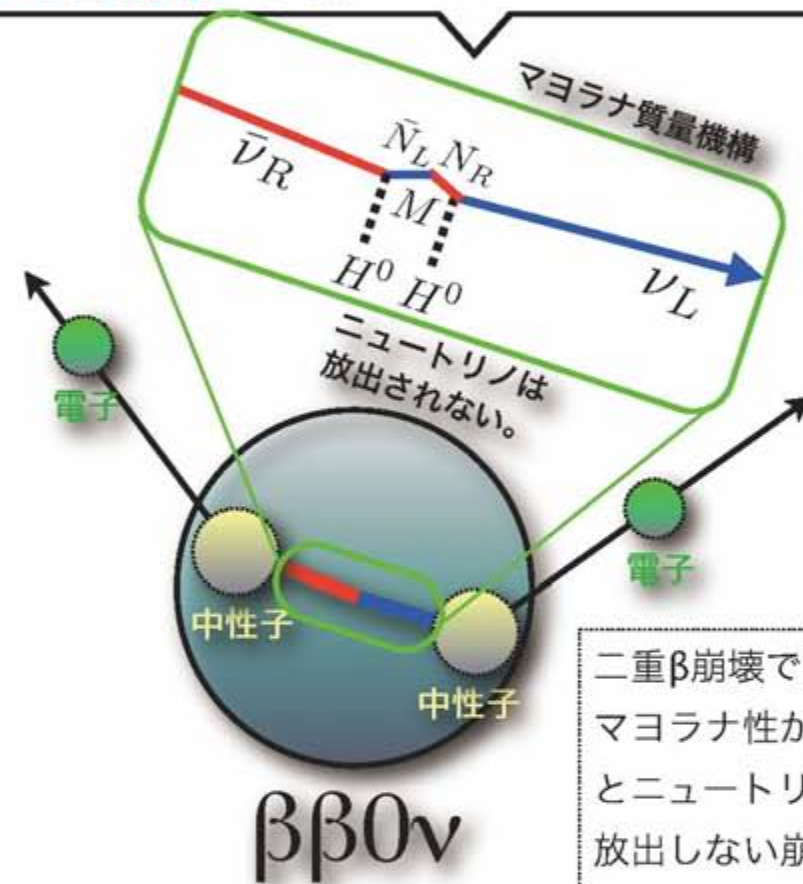
ニュートリノの質量起源を説明し大統一理論と密接に関係するシーソー模型や宇宙の物質優勢を説明するレプトジェネシス理論の基礎となるニュートリノのマヨラナ性を実証する唯一の手法である。ニュートリノ質量構造の決定にも最も感度が高い。

## 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。



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。



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。

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。

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。

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。

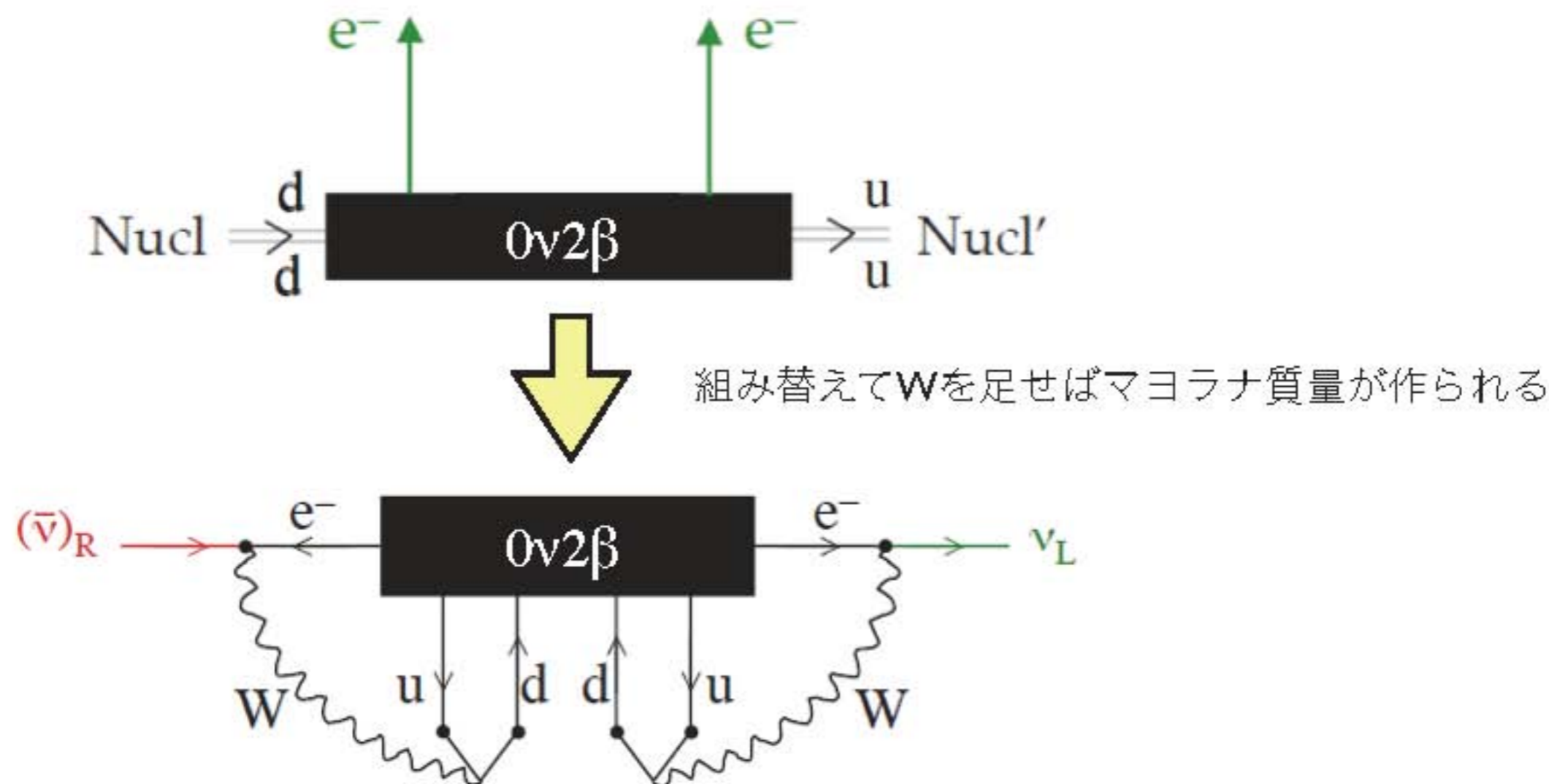
ニュートリノレス二重β崩壊の発見

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。

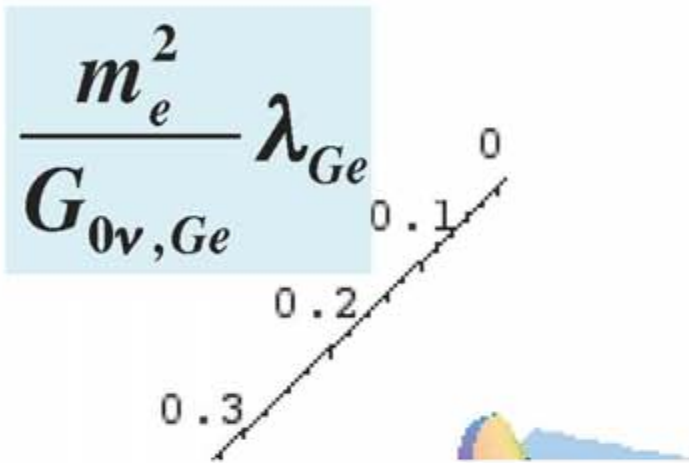
モデル検証には角分布測定や他原子核での測定が有効

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

# Discerning Models

Key ingredient: several isotopes

See hep-ph/0405237  
For similar work



$\frac{m_e^2}{G_{0\nu}} \lambda$	Ge	Te	Xe
	0.4	0.5	0.9
<b>R</b>	0.2	0.1	0.04

Civitarese  
Suhonen  
NPA729, 867

Rodin et al.  
nucl-th/  
0503063

**Probably want at least 3 measurements!**

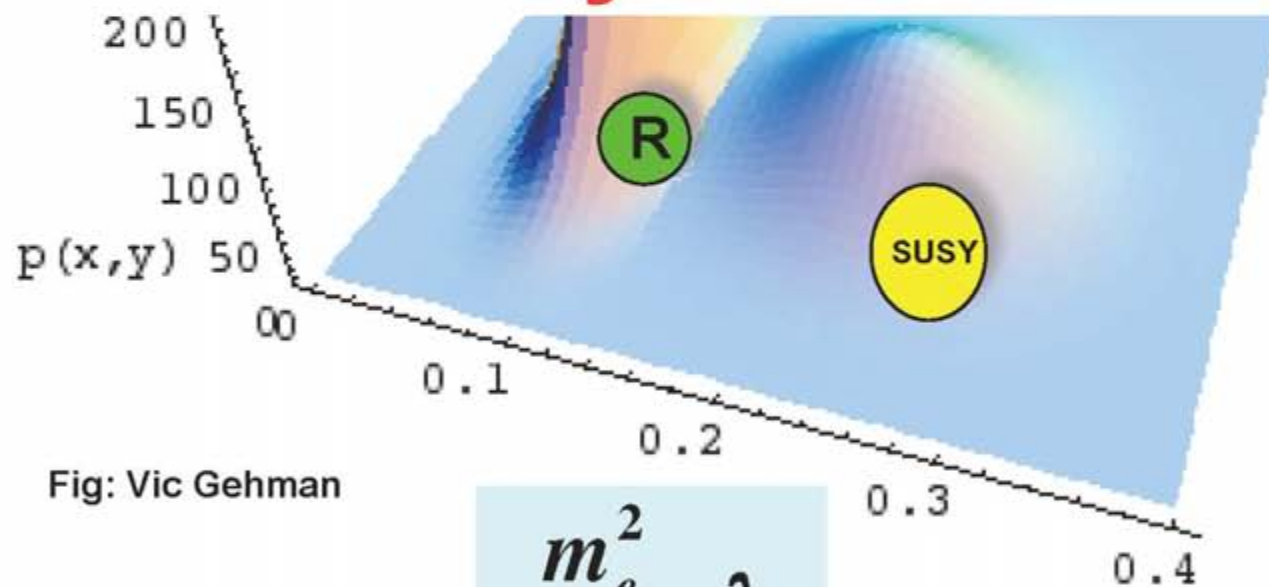


Fig: Vic Gehman

$$\frac{m_e^2}{G_{0\nu, Te}} \lambda_{Te}$$

	0.1	0.05	0.02
<b>SUSY</b>	0.2	0.2	0.08

Trier  
NPA654, 973c

Faessler et al.  
PRD58, 115004

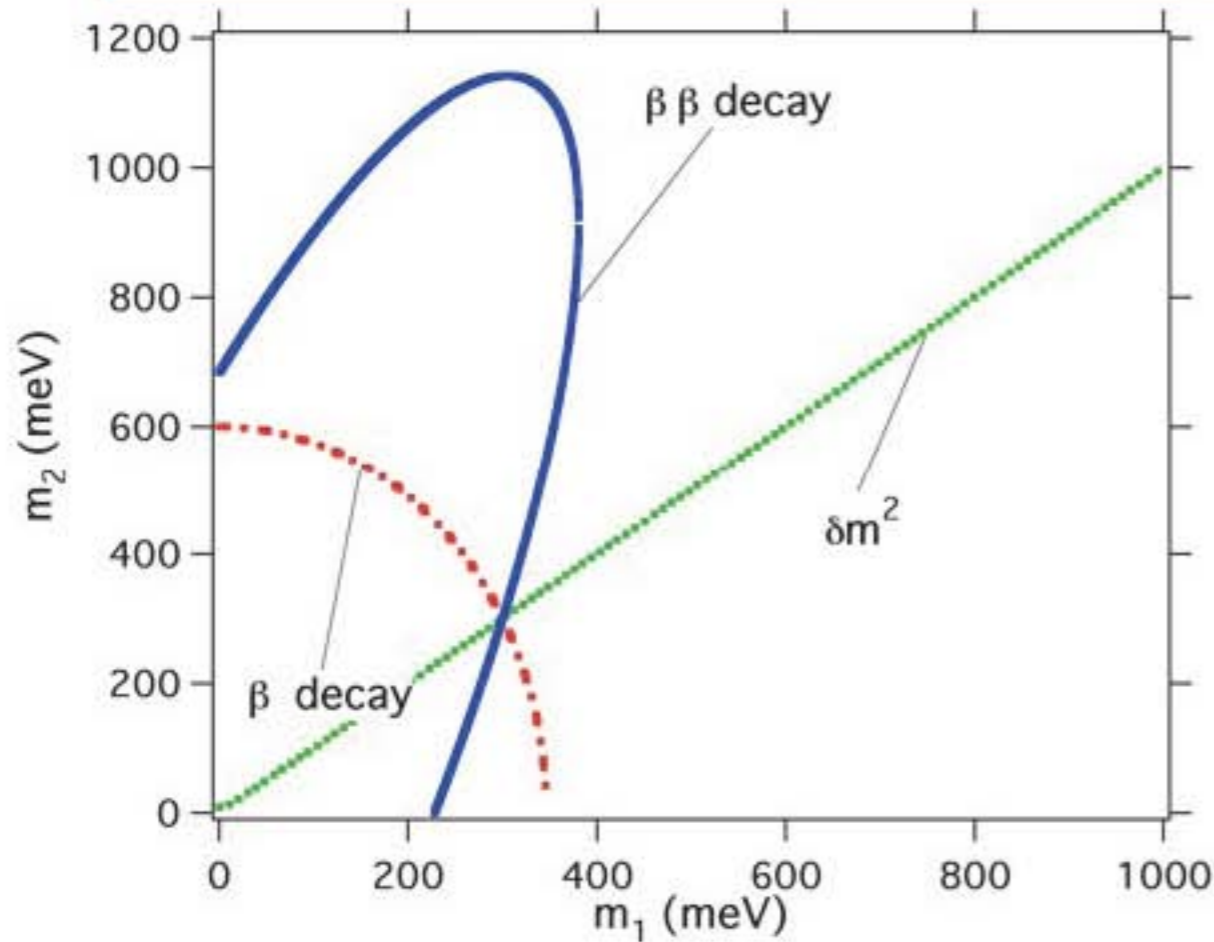
$$\frac{m_e^2}{G_{0\nu}} \lambda = M_{0\nu}^2 m_\nu^2 \quad \text{- or -} \quad = m_e^2 \eta_{SUSY}^2 M_{SUSY}^2$$

$$M_\nu = 200 \text{ meV}, \quad \eta = 1.5 \times 10^{-9}$$

$$U_{PMNS} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{13}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Dirac neutrino}} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\lambda_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\lambda_{31}} \end{pmatrix}}_{\text{Majorana neutrino}}$$

# The phase (if $U_{e3} = 0$ )

Similar work  
hep-ph/0205290

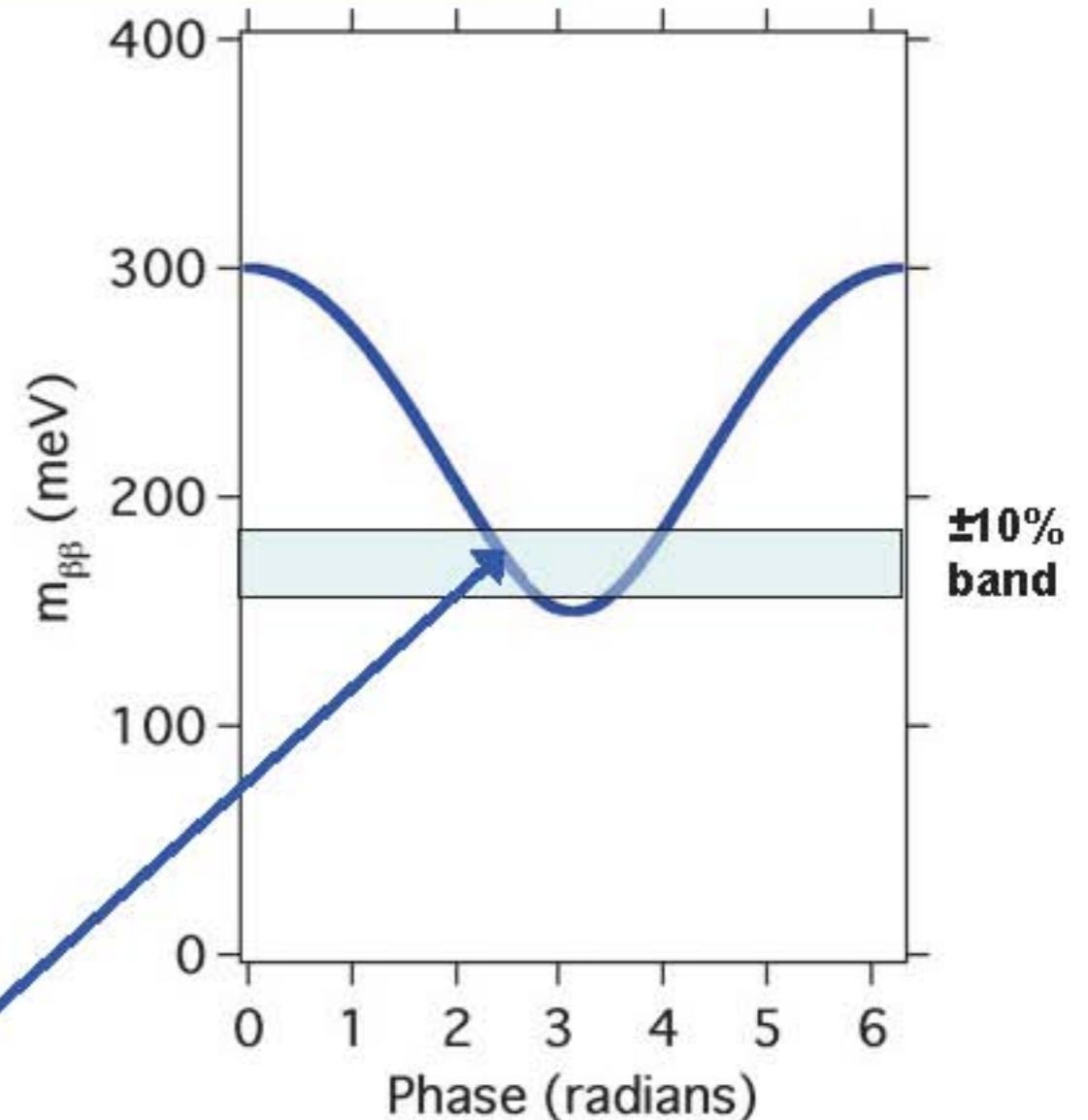


## Toy model example

$$M_1 = 300 \text{ meV}, \delta m^2 = (9 \text{ meV})^2$$

$$U_{e1} = 0.866, U_{e2} = 0.5, \alpha_{21} = 2.5$$

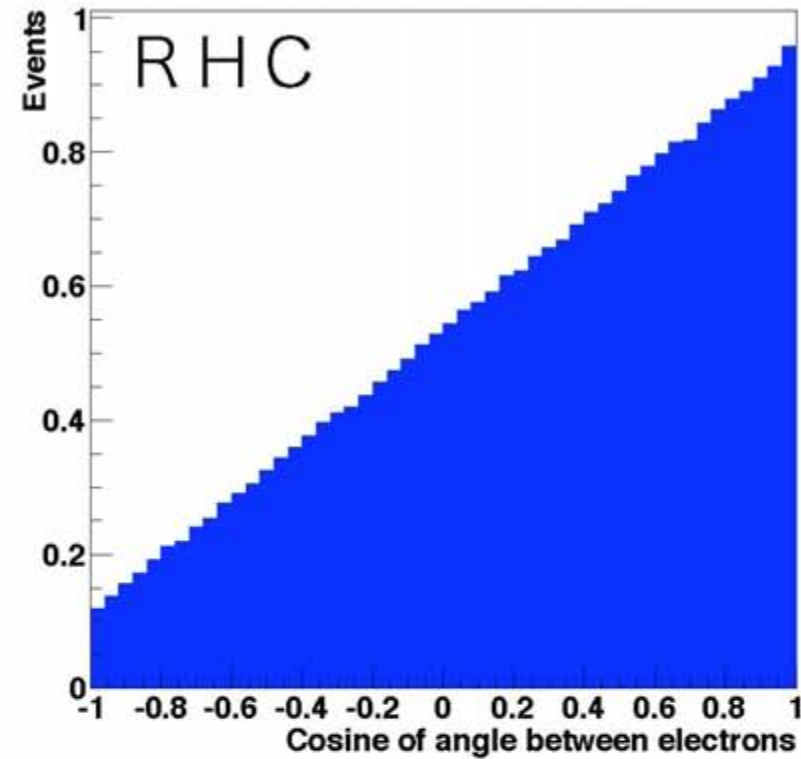
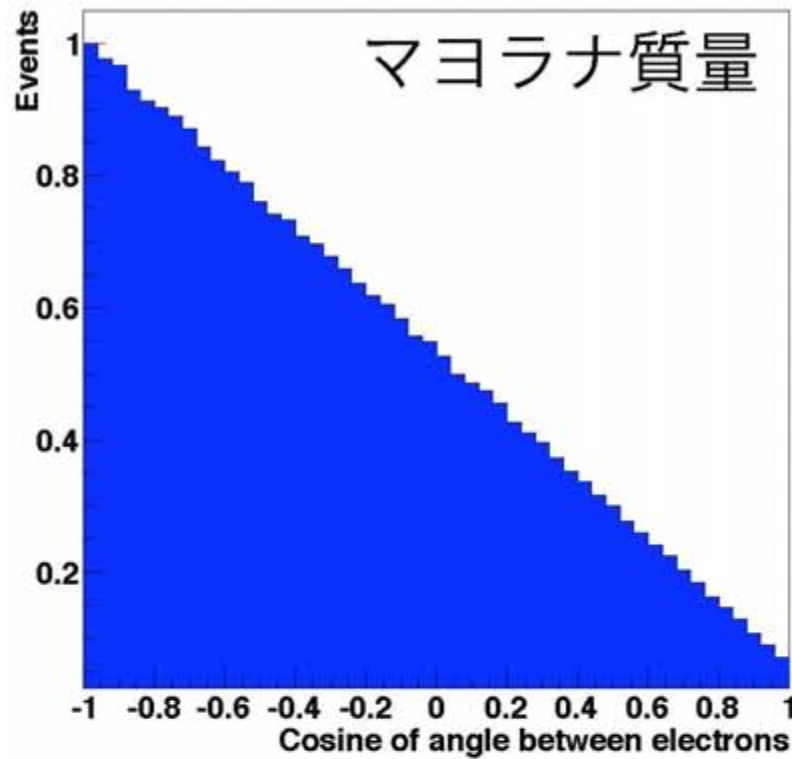
$$m_\beta = 300 \text{ meV}, m_{\beta\beta} = 171 \text{ meV}$$



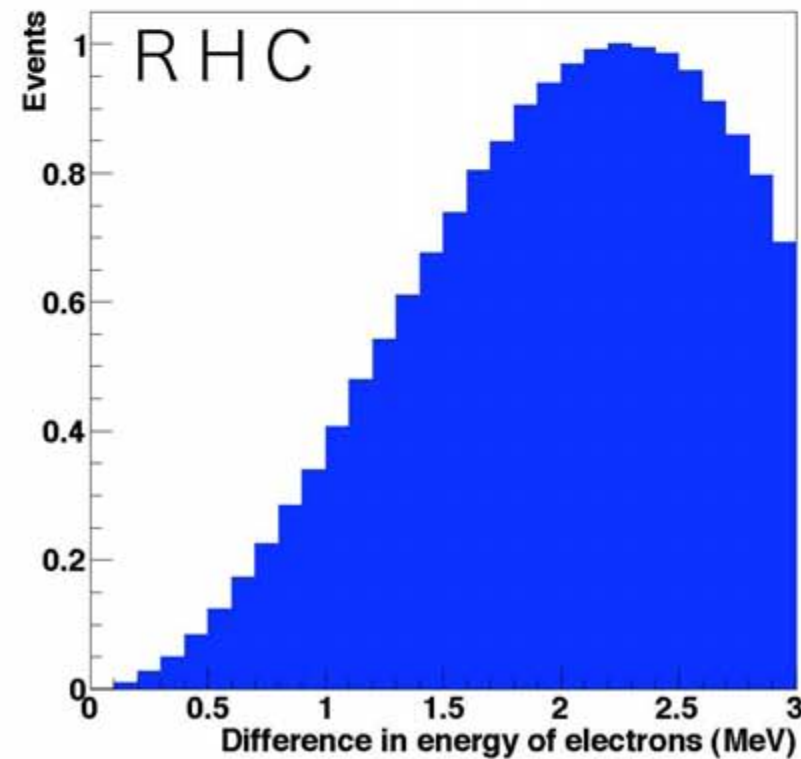
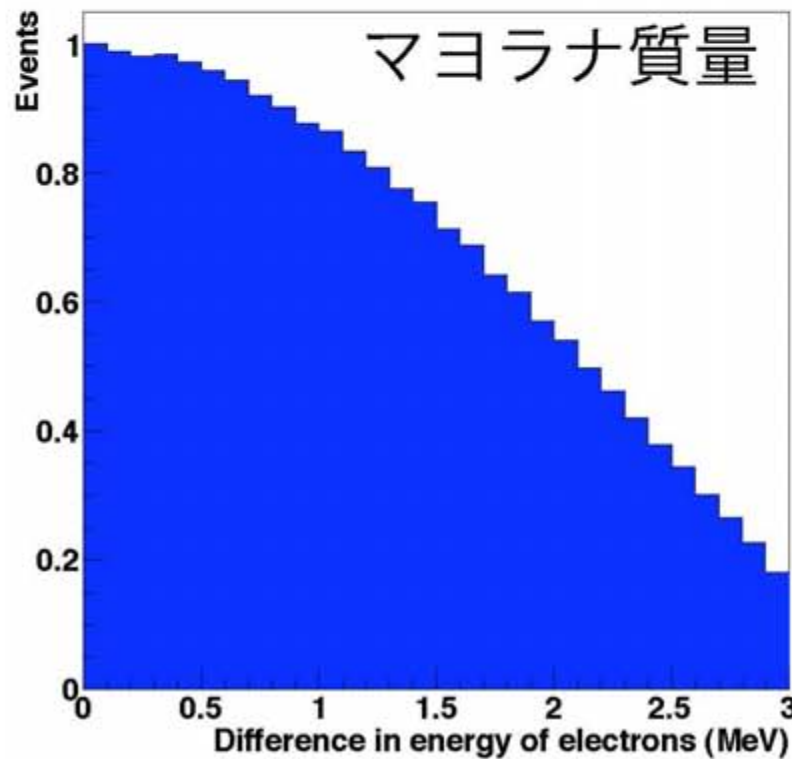
Majorana Phase

# トラッキングによるモデル識別例

角分布



$E_1 - E_2$



# 二重β崩壊研究のねらい

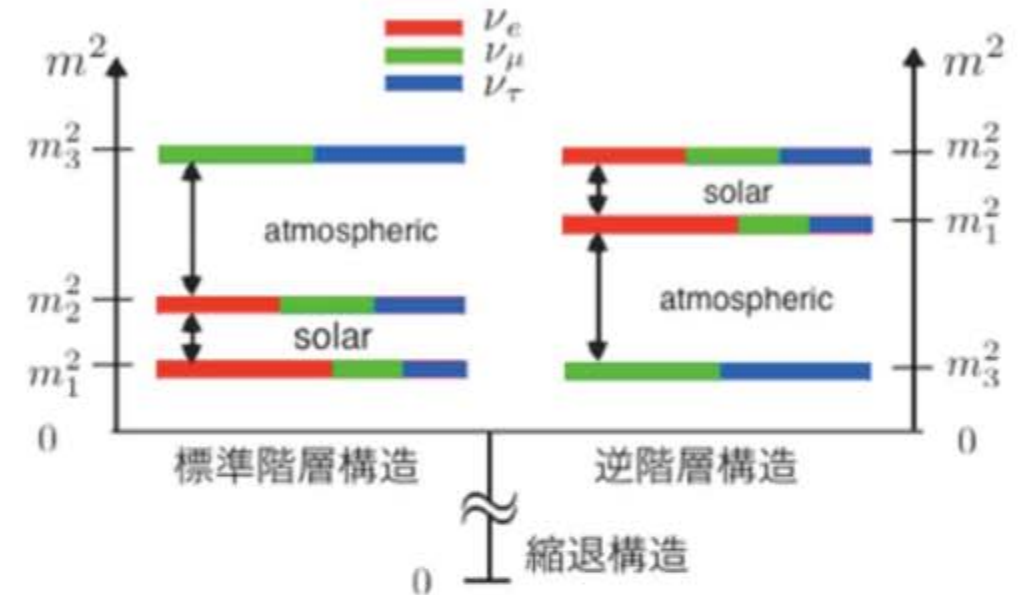
ニュートリノを伴わない  
二重ベータ崩壊の測定から

マヨラナニュートリノ

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

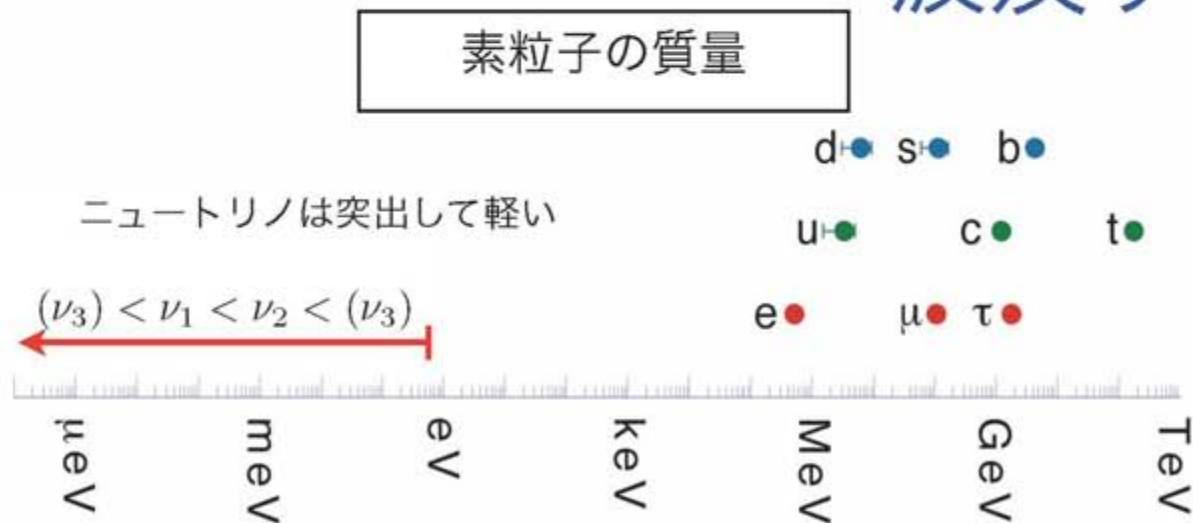
とわかる

ニュートリノ質量構造がわかる



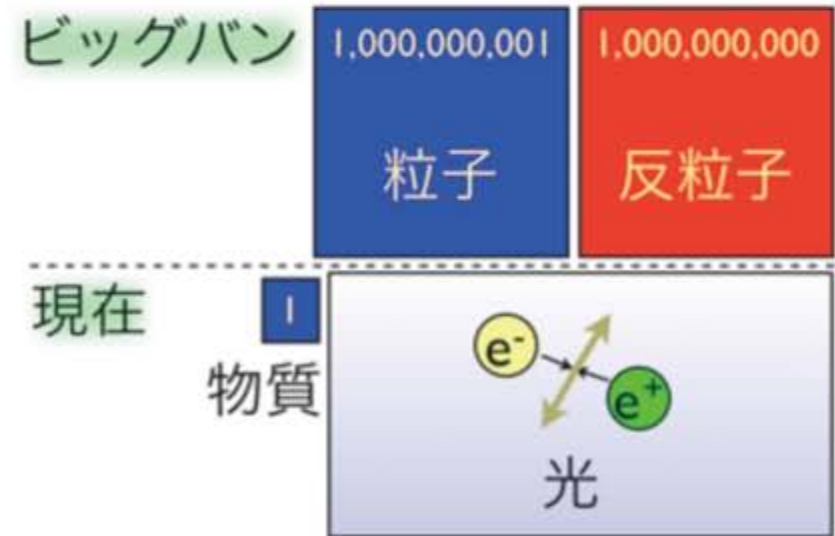
標準階層か逆階層かあるいは縮退構造か？  
質量絶対値は？

## 波及する研究



なぜνは軽いのか？

シーソー機構



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

見つからなかったら  
感度向上 → 大型化  
逆階層はカバーしたい。  
消去法・他手法との比較

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

KKDCの決着 →  $^{76}\text{Ge}$ での探索

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

他原子核 → CANDLES-IV  $^{48}\text{Ca}$   
その他

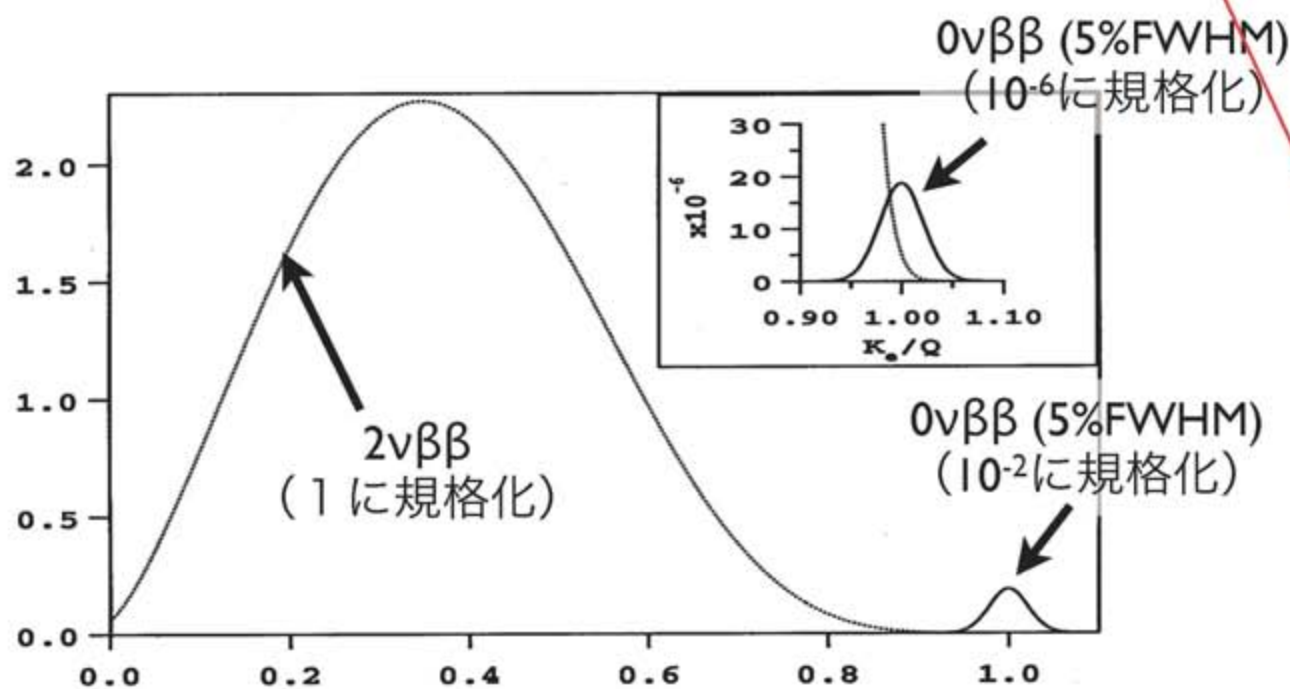
角分布 → DCBA  $^{150}\text{Nd}$  ほか  
エマルジョン 自由度高い  
MOON

$^{76}\text{Ge}$ での探索 → 国内にはない

$\beta$ 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。

# 二重β崩壊核の比較

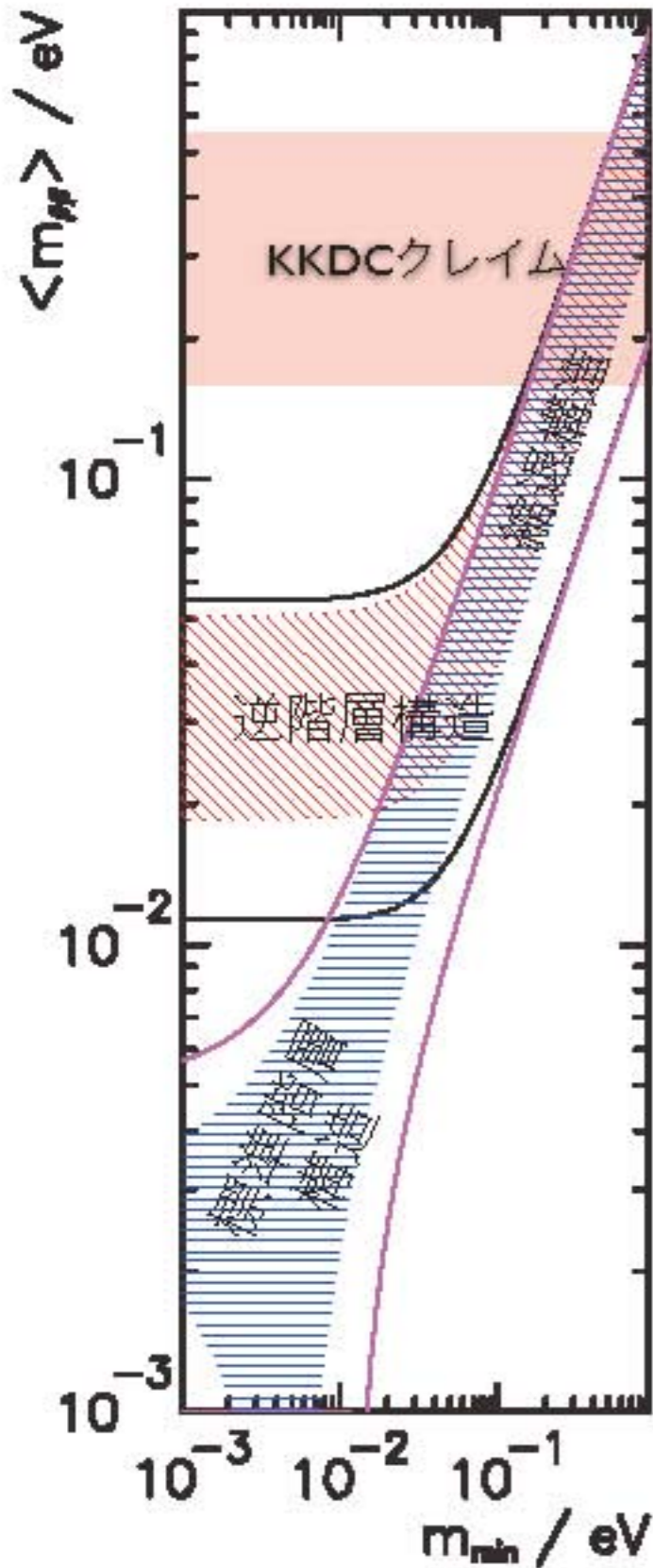
原子核	$T_{1/2}^{0\nu}$ (50 meV)	$T_{1/2}^{2\nu}$ 実験値 (year)	自然存在比 (%)	Q値 (keV)	
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$		$(4.2^{+2.1}_{-1.0}) \times 10^{19}$	0.19	4271	最大のQ、2ν早い 半導体
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	$0.86 \times 10^{27}$	$(1.5 \pm 0.1) \times 10^{21}$	7.8	2039	
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	$2.44 \times 10^{26}$	$(0.92 \pm 0.07) \times 10^{20}$	9.2	2995	
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	$0.98 \times 10^{27}$	$(2.0 \pm 0.3) \times 10^{19}$	2.8	3351	
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	$2.37 \times 10^{26}$	$(7.1 \pm 0.4) \times 10^{18}$	9.6	3034	2ν早い
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	$2.86 \times 10^{26}$	$(3.0 \pm 0.2) \times 10^{19}$	7.5	2805	
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	$2.16 \times 10^{26}$	$(0.9 \pm 0.1) \times 10^{21}$	34.5	2529	存在比大
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	$4.55 \times 10^{26}$	$> 10^{22}$	8.9	2476	2ν遅い、希ガス
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	$2.23 \times 10^{25}$	$(7.8 \pm 0.6) \times 10^{18}$	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

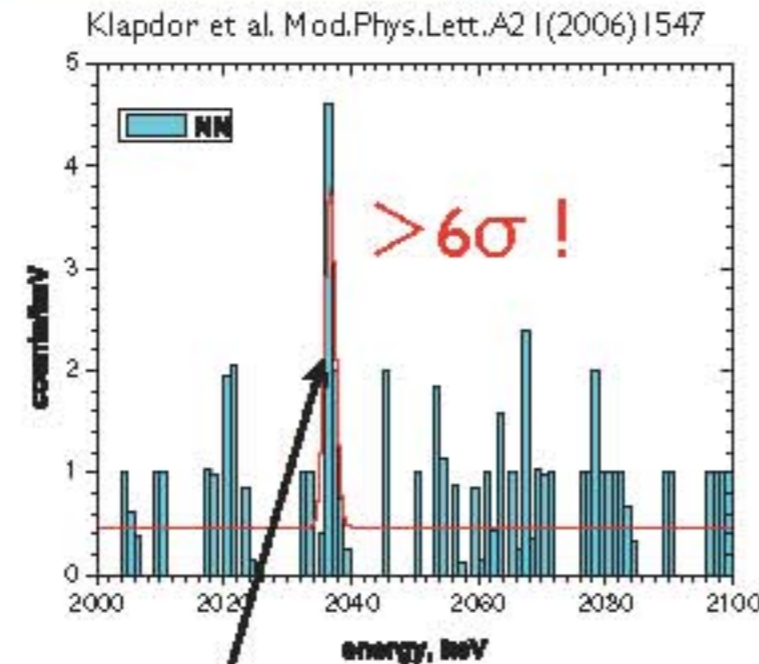
$T^{0\nu} / T^{2\nu}$  が小さいと高分解能  
でなくても良い。

# Milestone



hatch:  
unknown CP phase only  
Solid:  
w/ uncertainty from oscillation parameters

## KKDCクレイム Heidelberg Moscow実験の一部

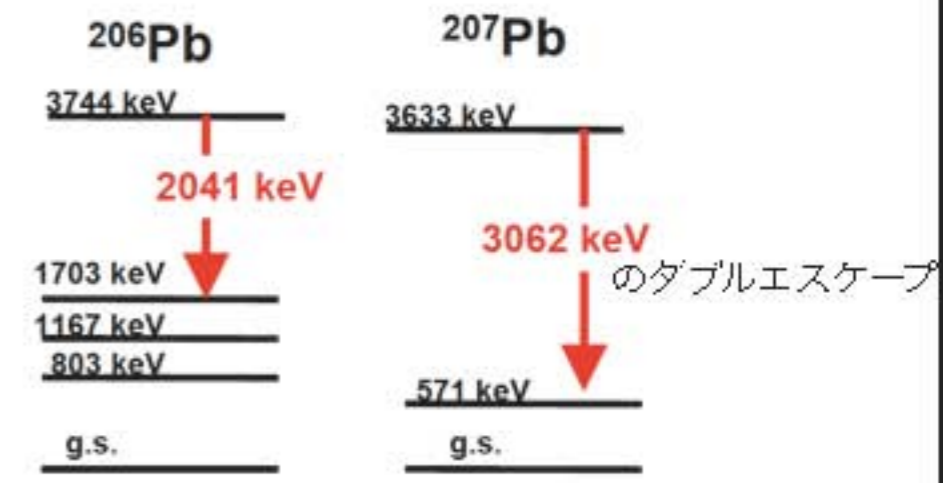


11 kgの $^{76}\text{Ge}$

データ量 71 kg・年  
 $T_{1/2} = 2.23^{+0.44}_{-0.31} \times 10^{25}$  年  
 $m_{\nu} = 320 \pm 30$  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 $\beta$ 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。



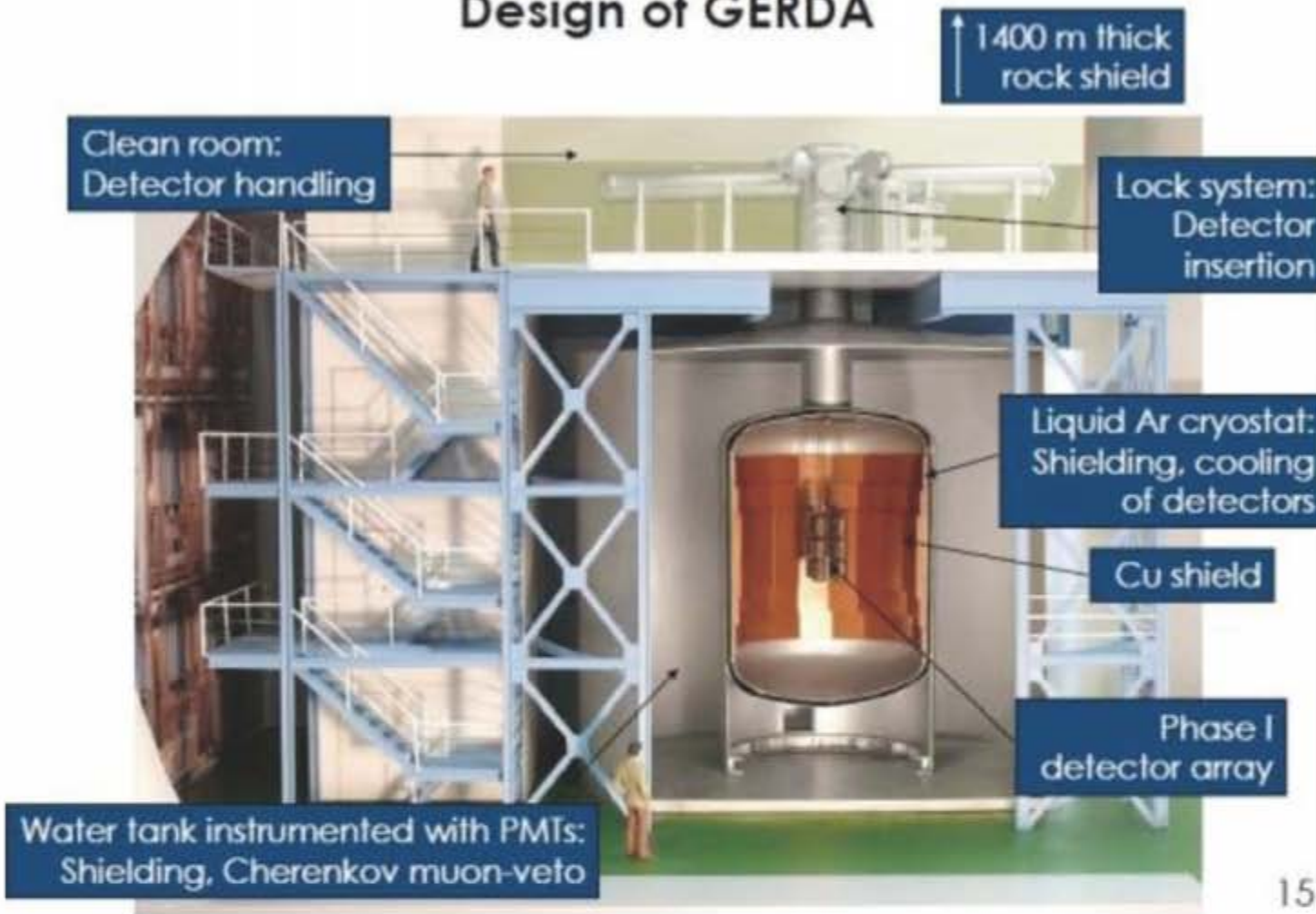
## 巨大かつ低バックグラウンドが必要!

	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

## Design of GERDA



15

Removal of matter

Use of liquid nitrogen or argon for active shielding

Segmented detectors in futur

Improvement of Pulse Shape Analysis

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

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

Start 2011 at Gran Sasso

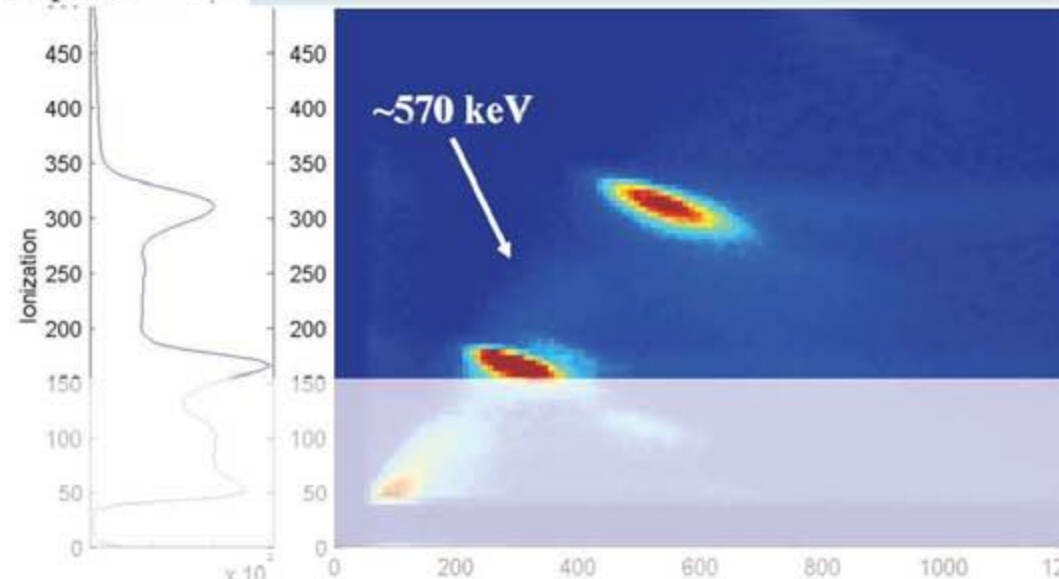
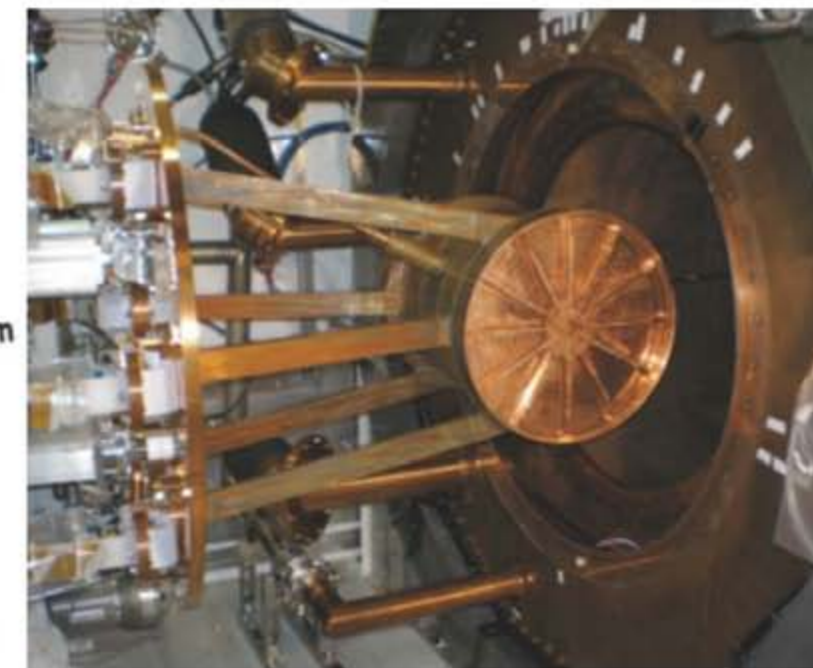
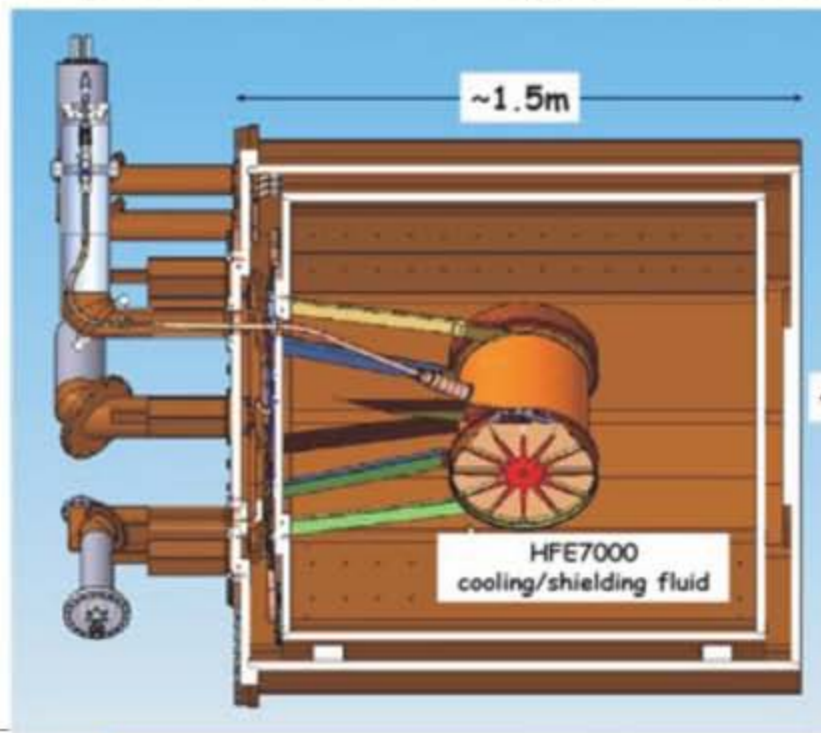
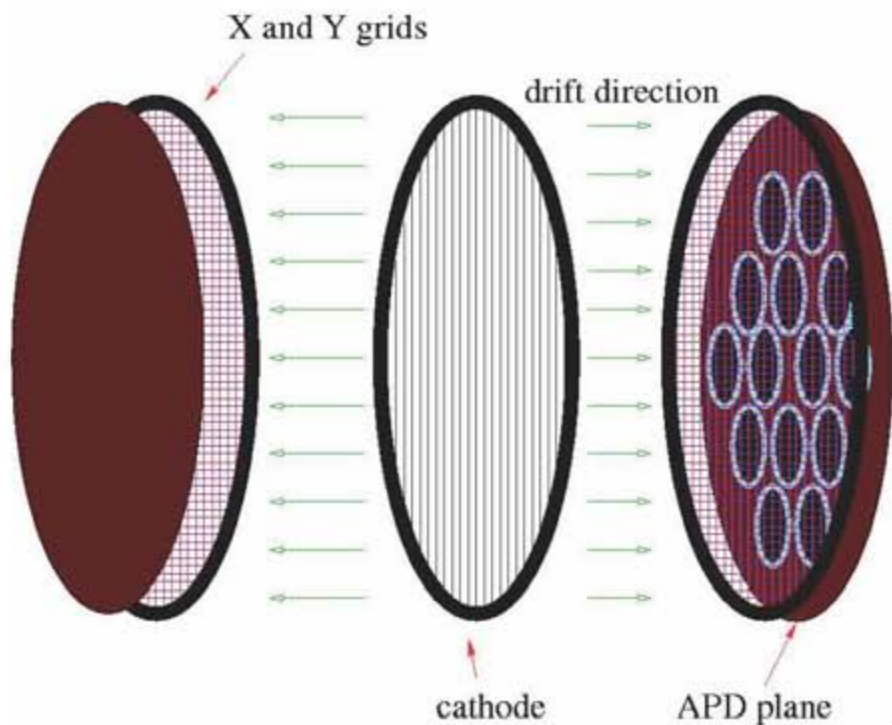
$$T_{1/2} > 3 \cdot 10^{25} \text{ yr} \quad \langle m_\nu \rangle < 0.25 \text{ eV}$$

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

if  $B=10^{-3}$  cts/keV/kg/an  $T_{1/2} > 2 \cdot 10^{26}$  yr in 3 years of data  $\langle m_\nu \rangle < 0.1 \text{ eV}$

# EXO-200 @ WIPP

liquid Xenon 200 kg (80% enrichment)



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

sensitivity ~150 meV  
 (2 years)

external  $^{208}\text{Tl}$   $\gamma$  limited

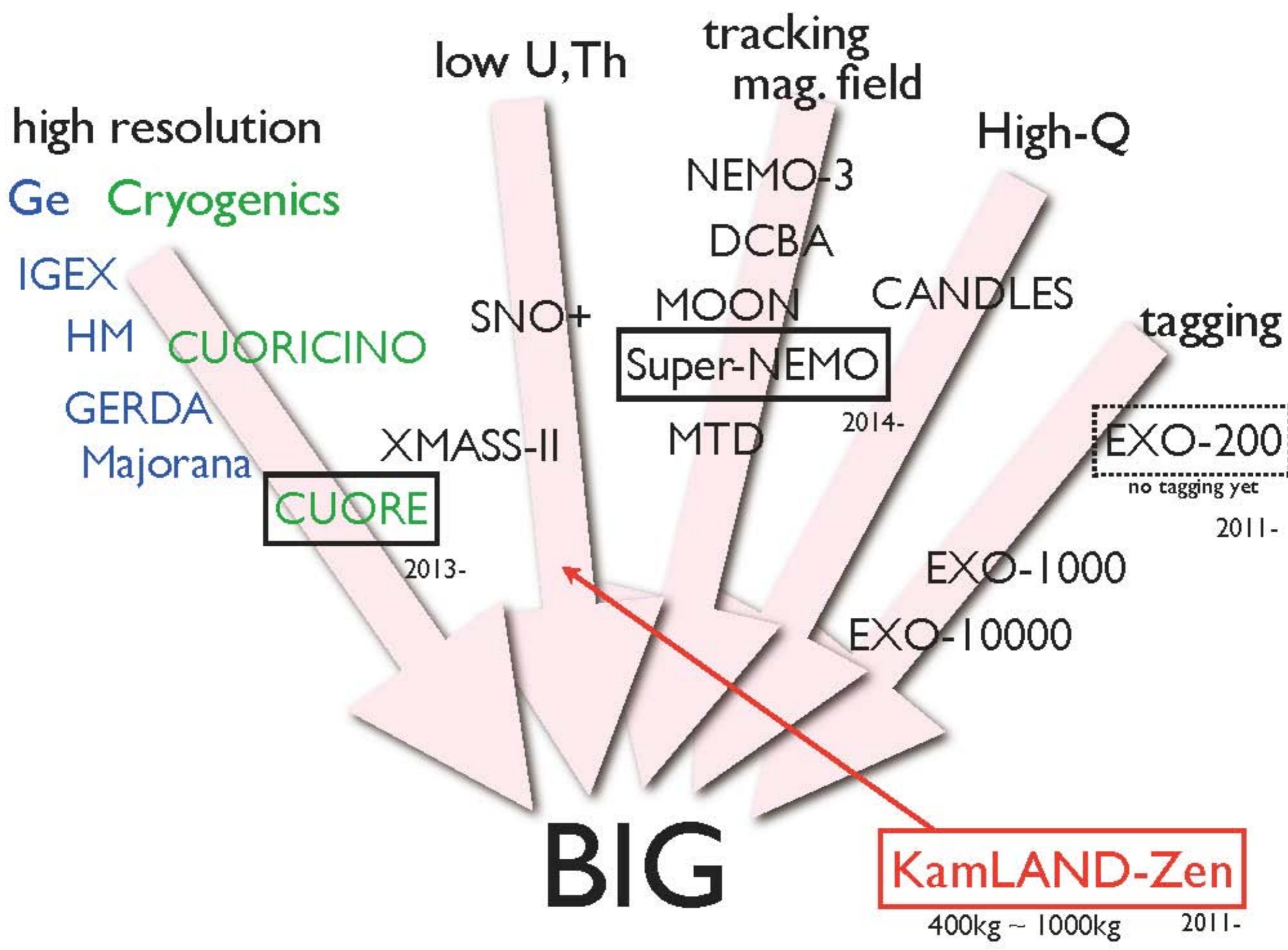
**Subject: postdoc**

Dear Juan

as you may know EXO-200 is now taking data with enriched Xenon. I am looking for a strong postdoc to help with data analysis at this very exciting time and I would be grateful if you could point me to suitable candidates

Best Regards  
 Giorgio

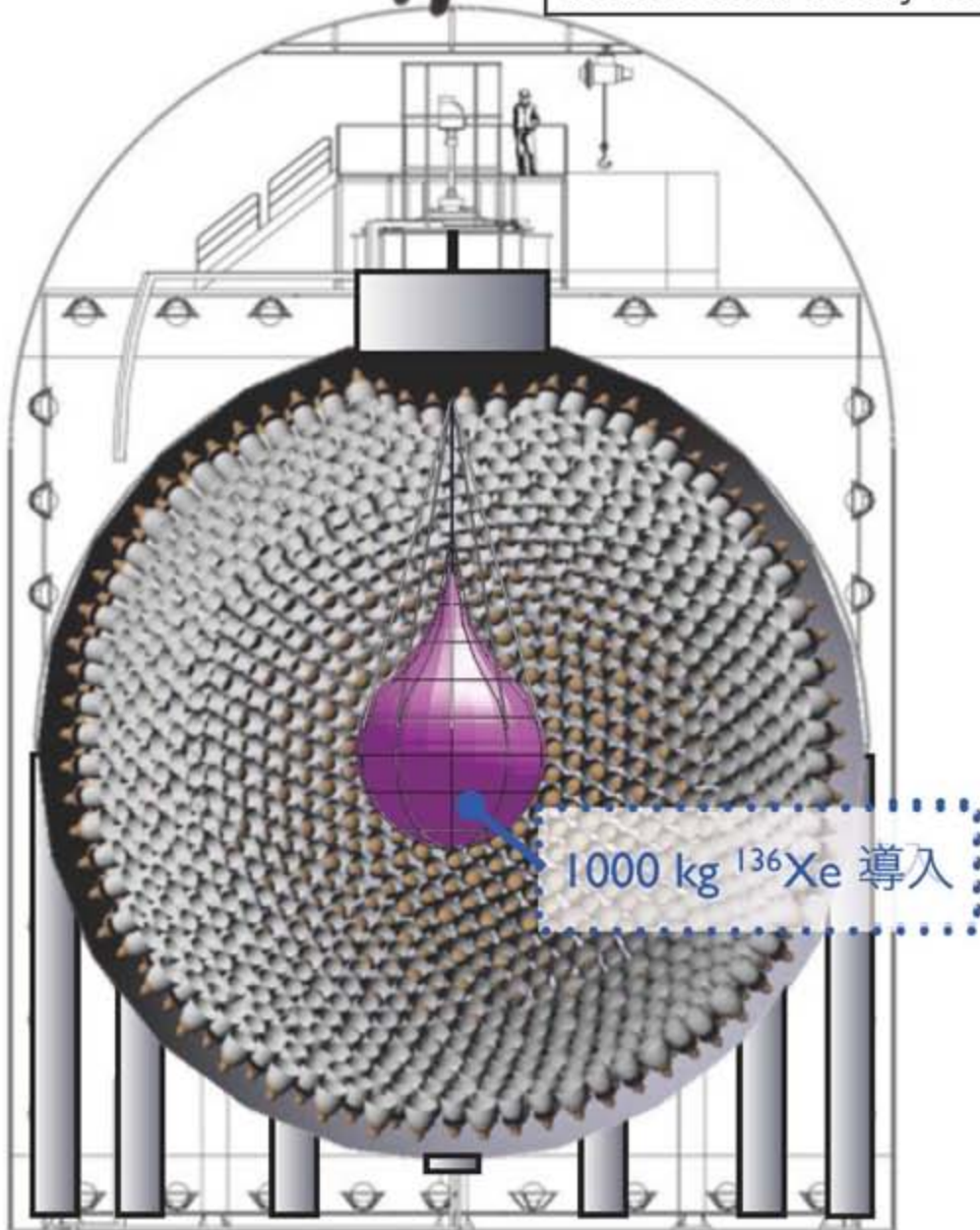
200kg  $\times$  80%  $^{136}\text{Xe}$  detector is running!



# KamLAND2-Zen

カムランド 裸

Zero Neutrino  
double beta decay search



1000 kg <sup>136</sup>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)

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

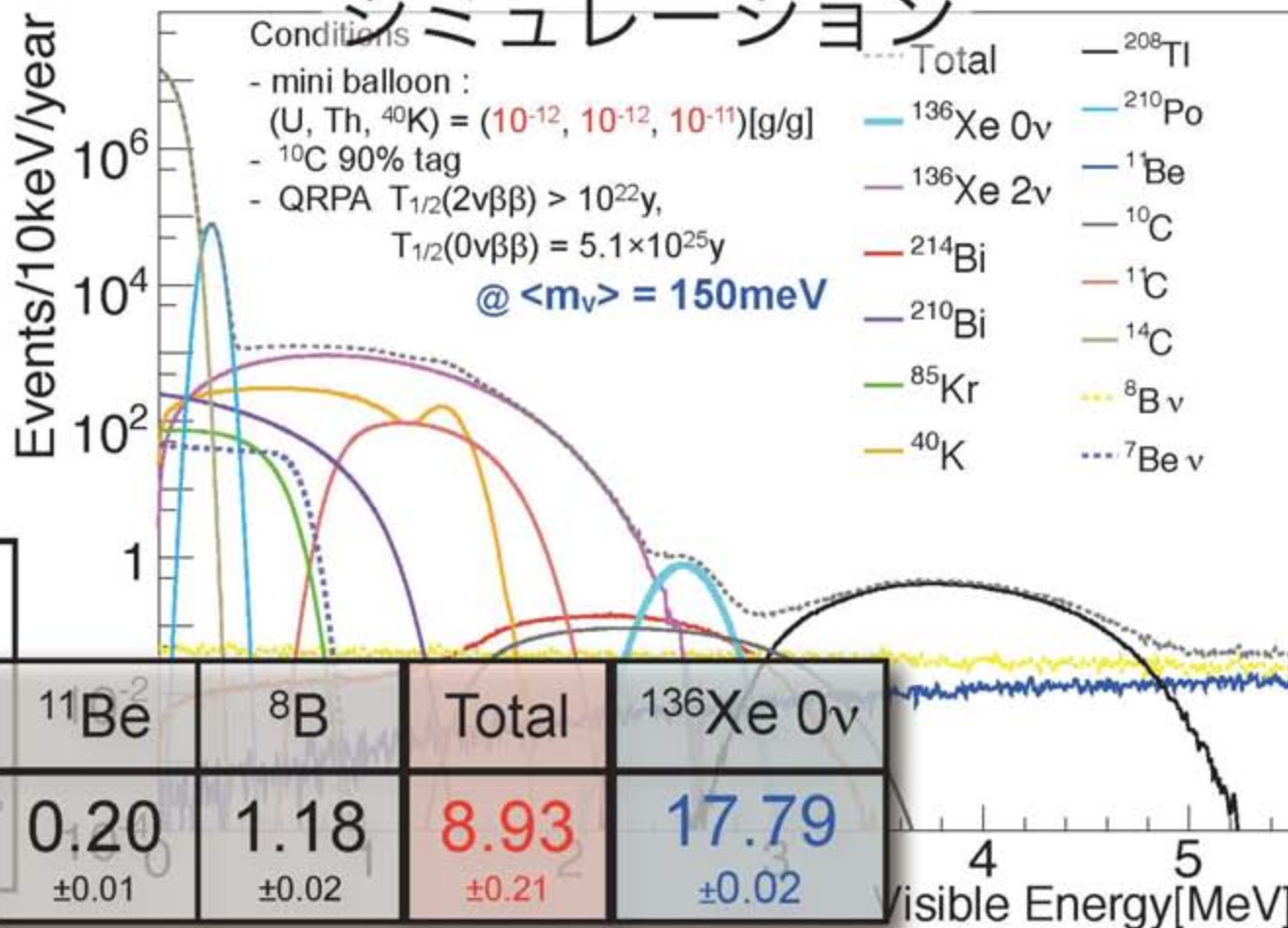
- ほぼ無改造で二重ベータ崩壊核を導入できるため低コストで高感度が実現できる。(390kg 納入済み、8月開始予定)

~60 meV in 2 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



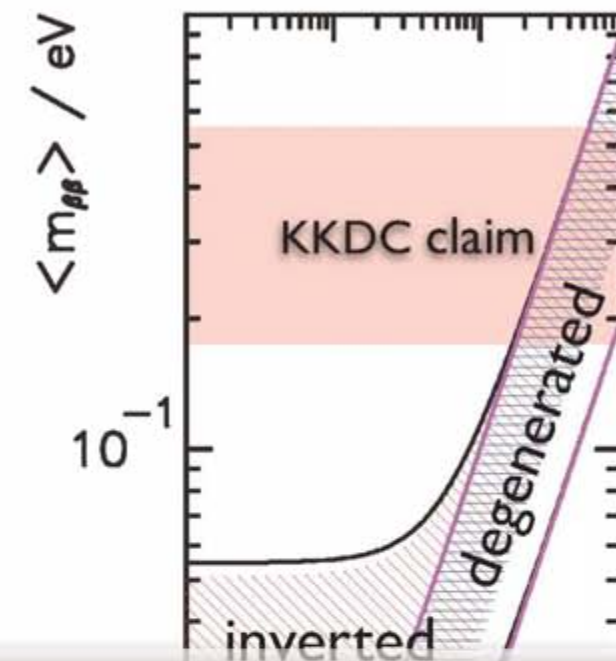
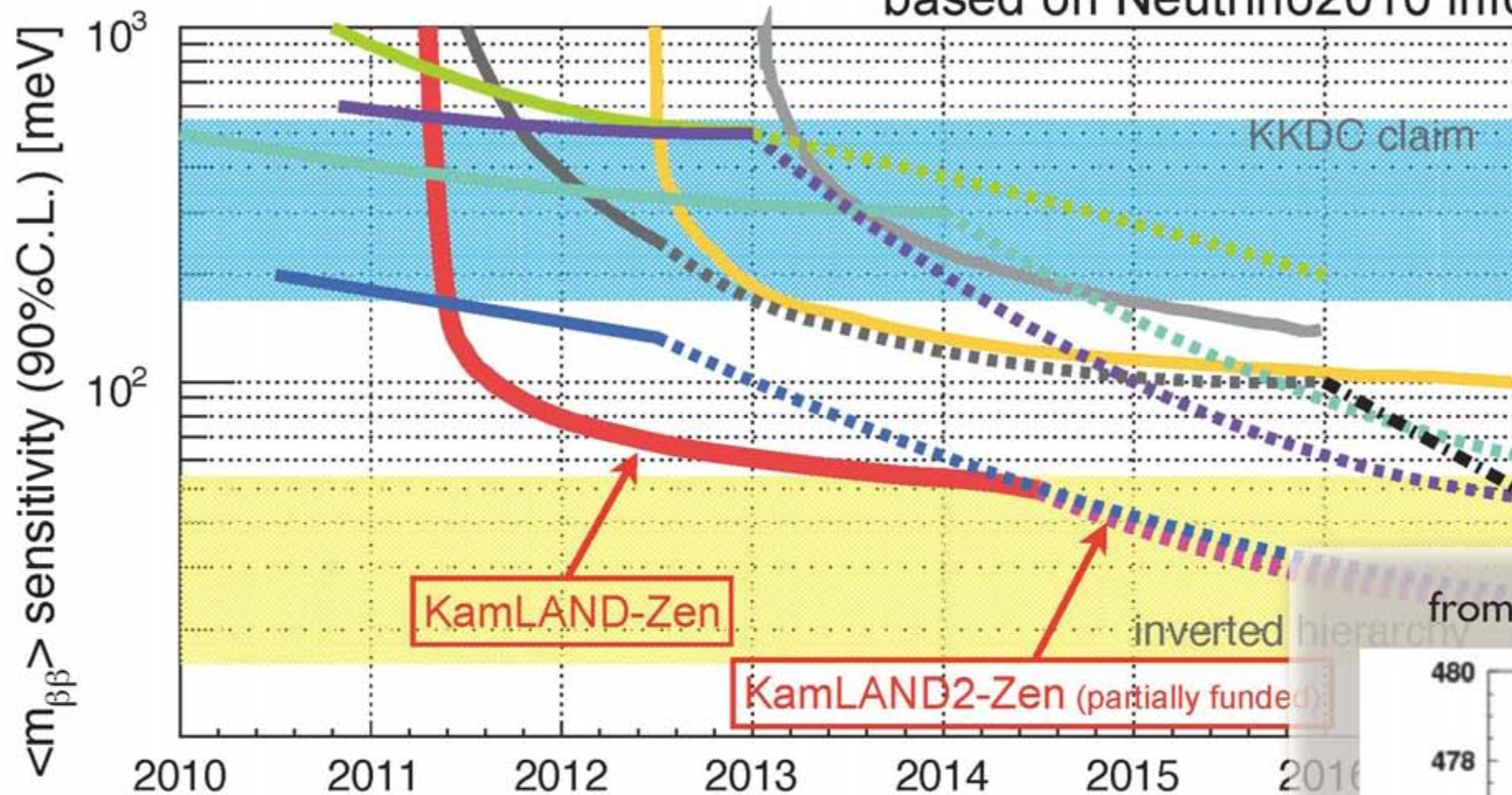
## キセノンを使うメリット

- 同位体濃縮、純化手法が確立している。
- シンチレータに3% <sup>136</sup>Xe 2v で回収容易。
- 2v2βの半減期が長く (T<sub>1/2</sub> > 10<sup>22</sup>年)、分解能への要求が低い。

<sup>136</sup> Xe 2v	<sup>208</sup> Tl	<sup>214</sup> Bi	<sup>10</sup> C	<sup>11</sup> Be	<sup>8</sup> B	Total	<sup>136</sup> Xe 0v
1.93	1.18 × 10 <sup>-2</sup>	3.15	2.44	0.20	1.18	8.93	17.79
±0.15	±0.12 × 10 <sup>-2</sup>	±0.01	±0.01	±0.01	±0.02	±0.21	±0.02

# Expected sensitivity of KamLAND-Zen

based on Neutrino2010 info.



from Y. Takeuchi neutrino 2010

## Scintillator

- KamLAND ( $^{136}\text{Xe}$ , 400kg)
- ▨ KamLAND ( $^{136}\text{Xe}$ , 1000kg) light concentrator  
brighter LS  
(pressurized Xenon)
- SNO+ ( $^{150}\text{Nd}$ ), 56kg
- CANDLES III ( $^{48}\text{Ca}$  300g)
- ▨ CANDLES IV ( $^{48}\text{Ca}$  3kg)

## Tracking

- NEMO-3 ( $^{100}\text{Mo}$  7kg)
- ▨ SuperNEMO ( $^{150}\text{Nd}$  or  $^{82}\text{Se}$  100-200)

## Semi-Conductor

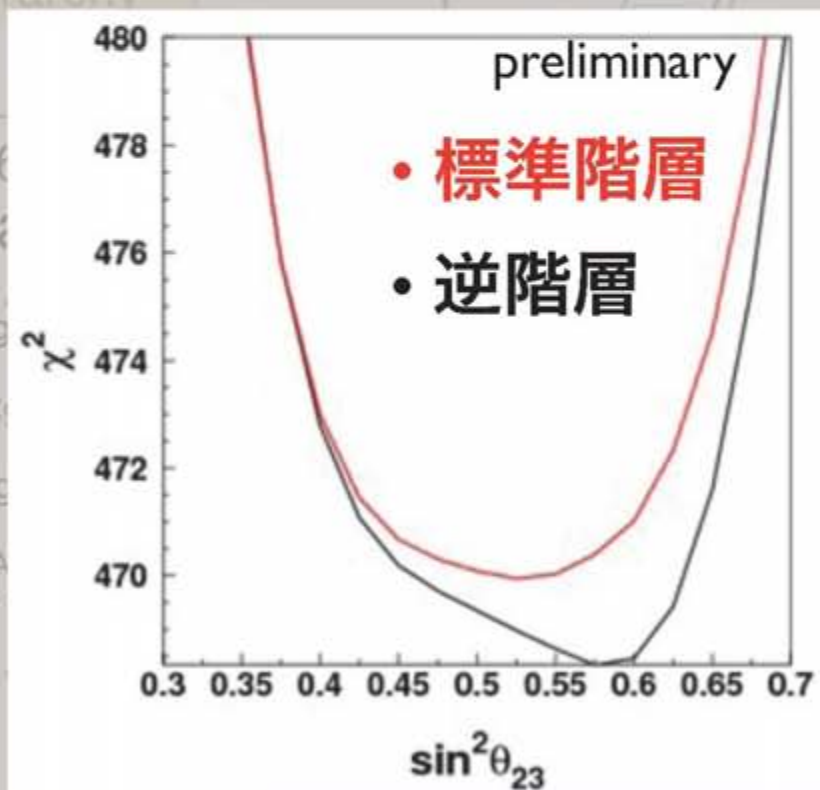
- MAJORANA ( $^{76}\text{Ge}$ ), 30-60kg
- GERDA phase I ( $^{76}\text{Ge}$ : 17.66kg)
- ▨ GERDA phase II ( $^{76}\text{Ge}$ : 37.5kg)
- ▨ GERDA phase III + MAJORANA

## Bolometer

- CUORE-0 ( $^{130}\text{Te}$  ~10kg)
- ▨ CUORE ( $^{130}\text{Te}$  204kg)

## Liquid TPC

- EXO-200 ( $^{136}\text{Xe}$  200kg)
- ▨ EXO ( $^{136}\text{Xe}$  1t)



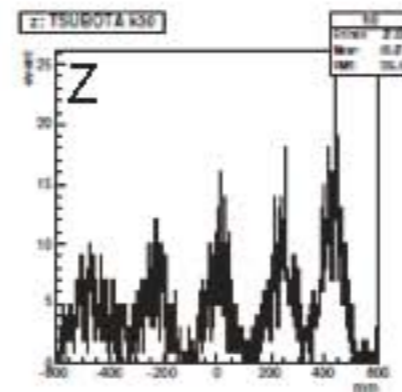
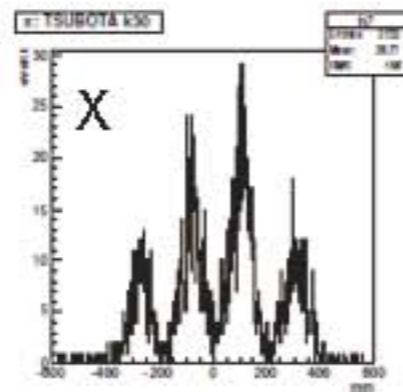
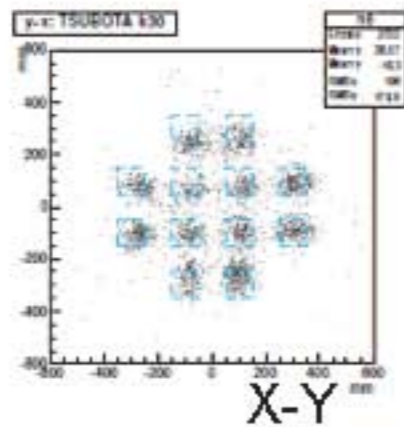
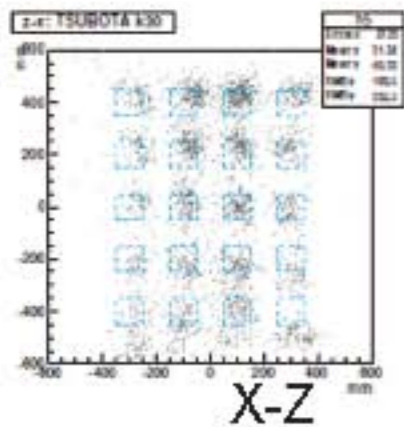
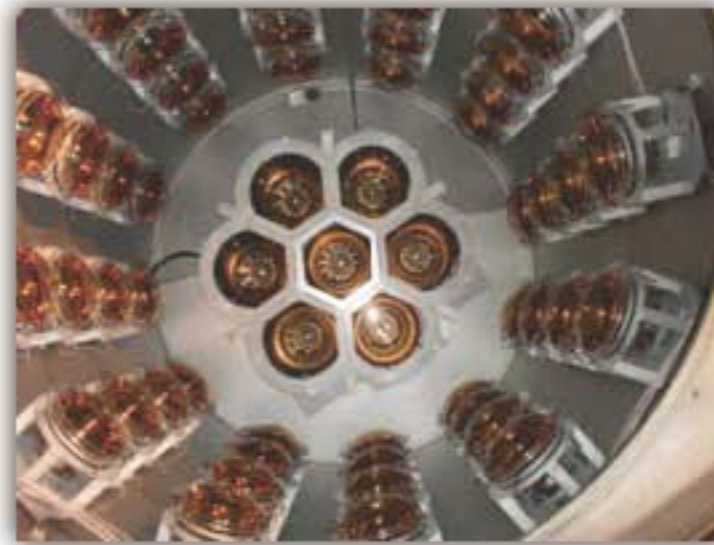
SK大気ニュートリノデータは  
逆階層を少し好んでいる!



# CANDLES III (about to start)

CaF<sub>2</sub> シンチレータ結晶

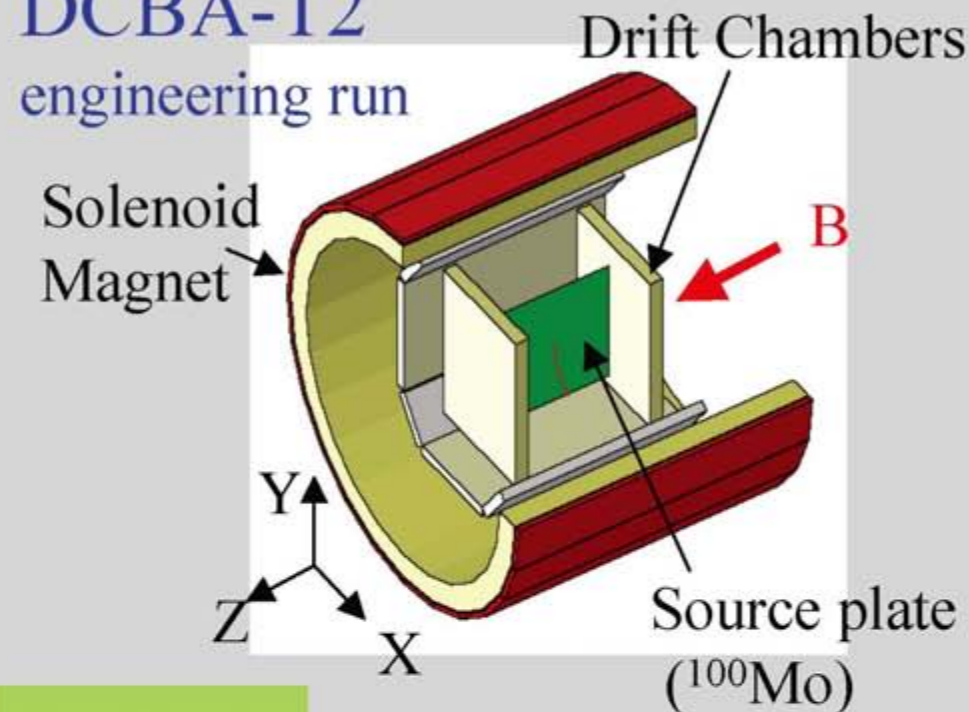
<sup>48</sup>Ca  
Q=4.27MeV



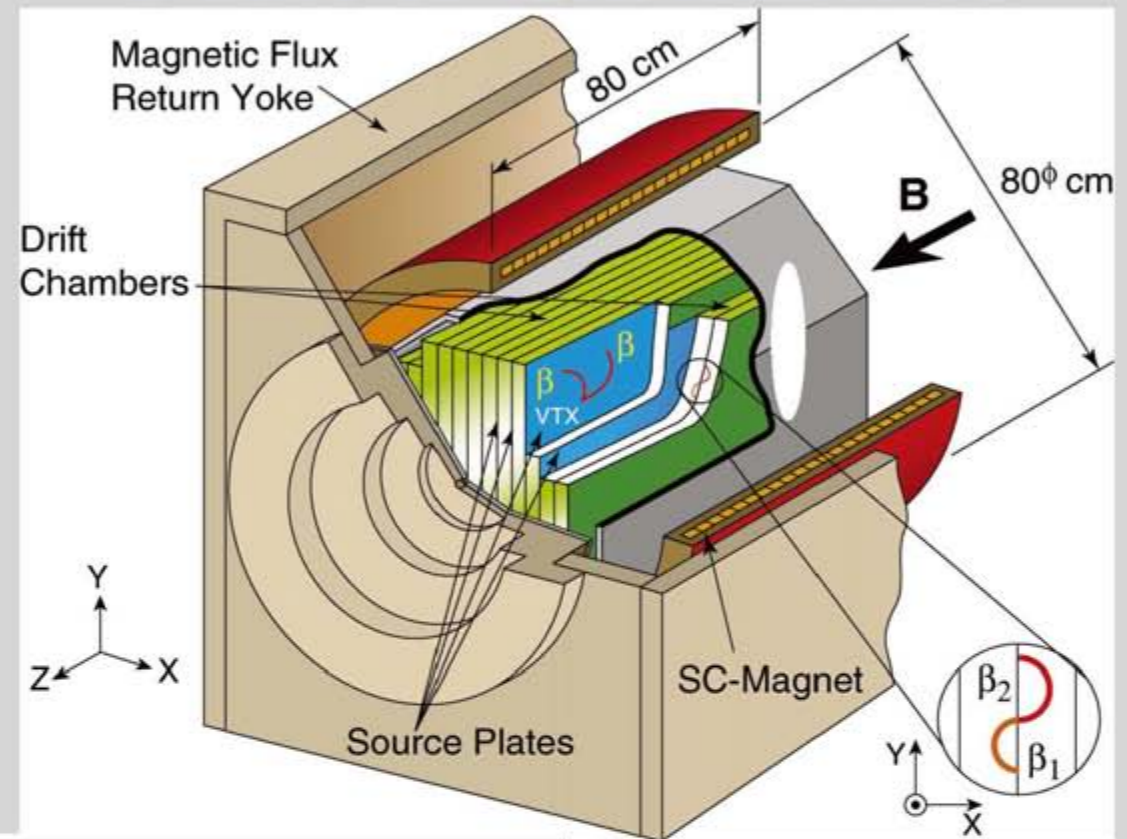
# Drift Chamber Beta Ray Analyser

## DCBA Experiment

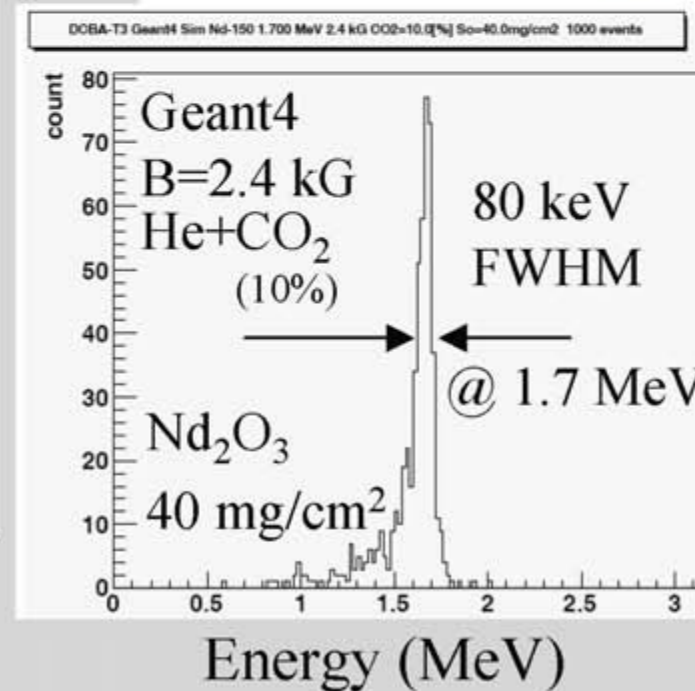
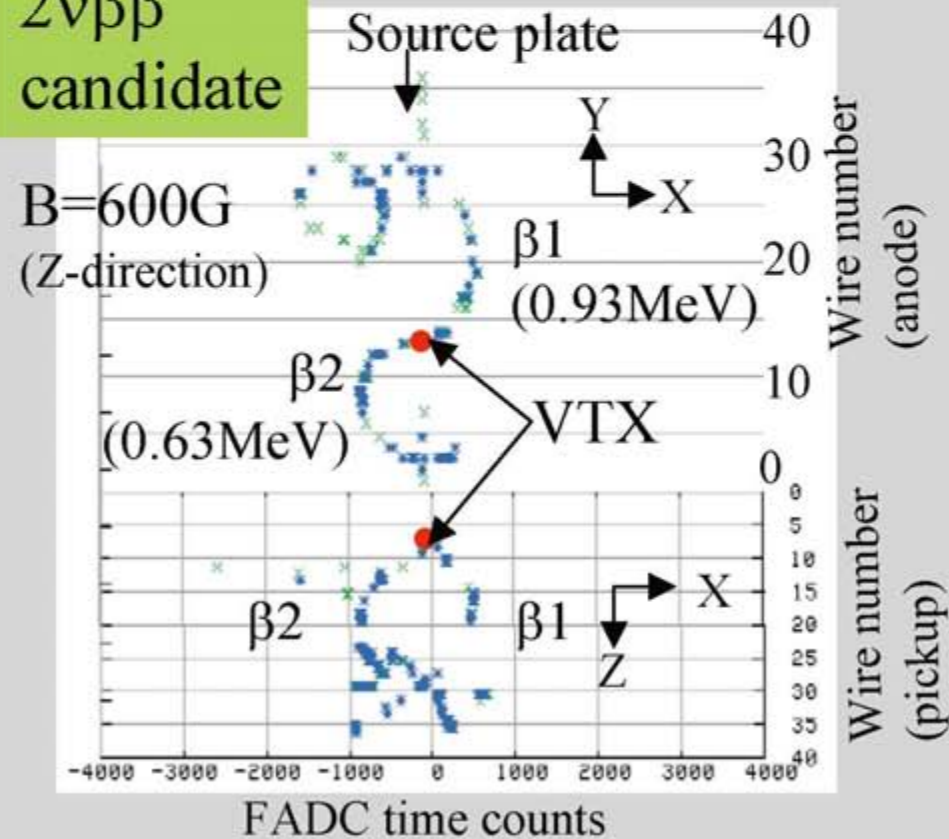
DCBA-T2  
engineering run



DCBA-T3 under construction



$2\nu\beta\beta$   
candidate



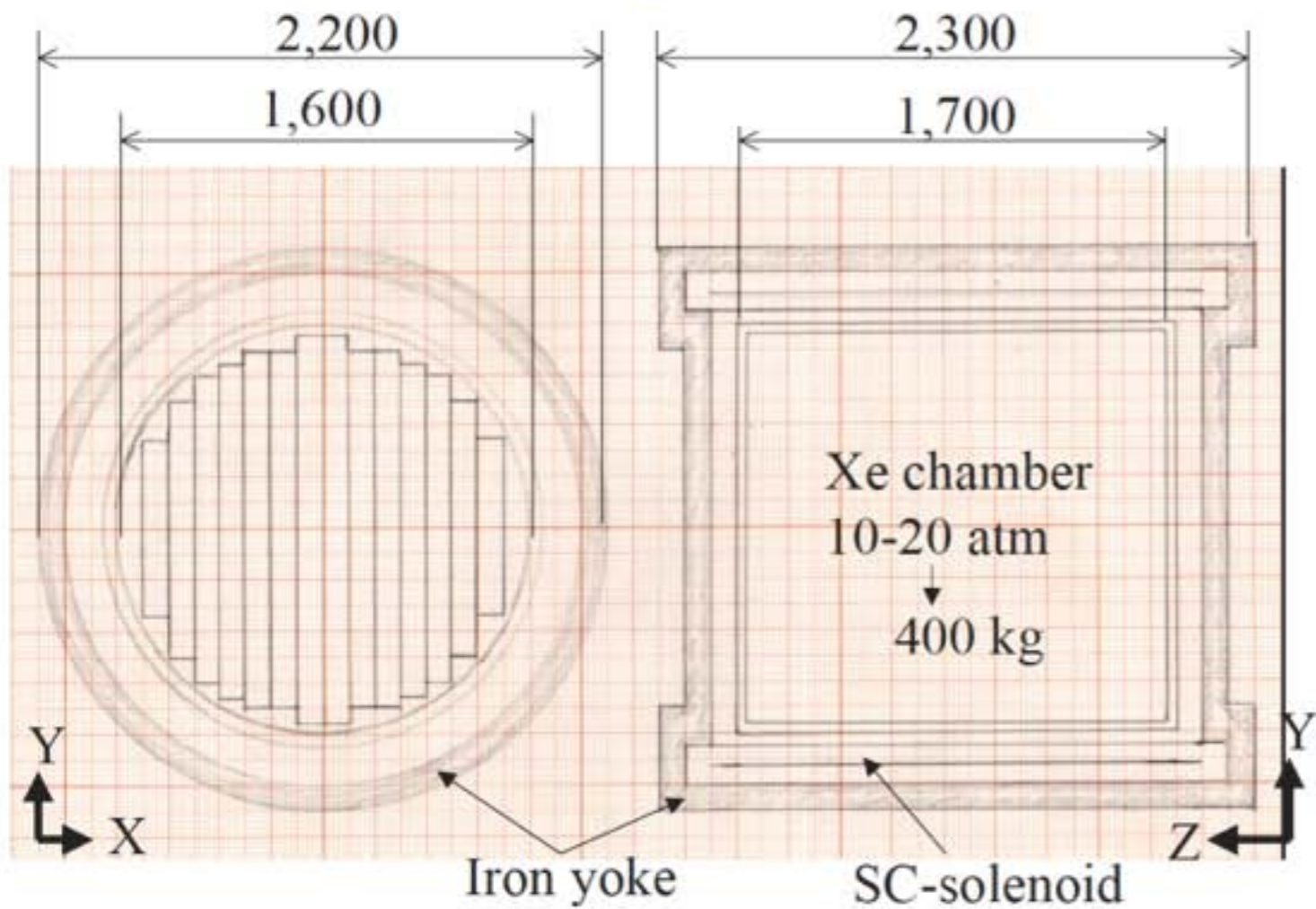
Corresponding  
 $\Delta E/E$   
=3.4% (FWHM)  
at Q of  $^{150}\text{Nd}$   
(=3.37 MeV)

Plots courtesy of  
DCBA collaboration

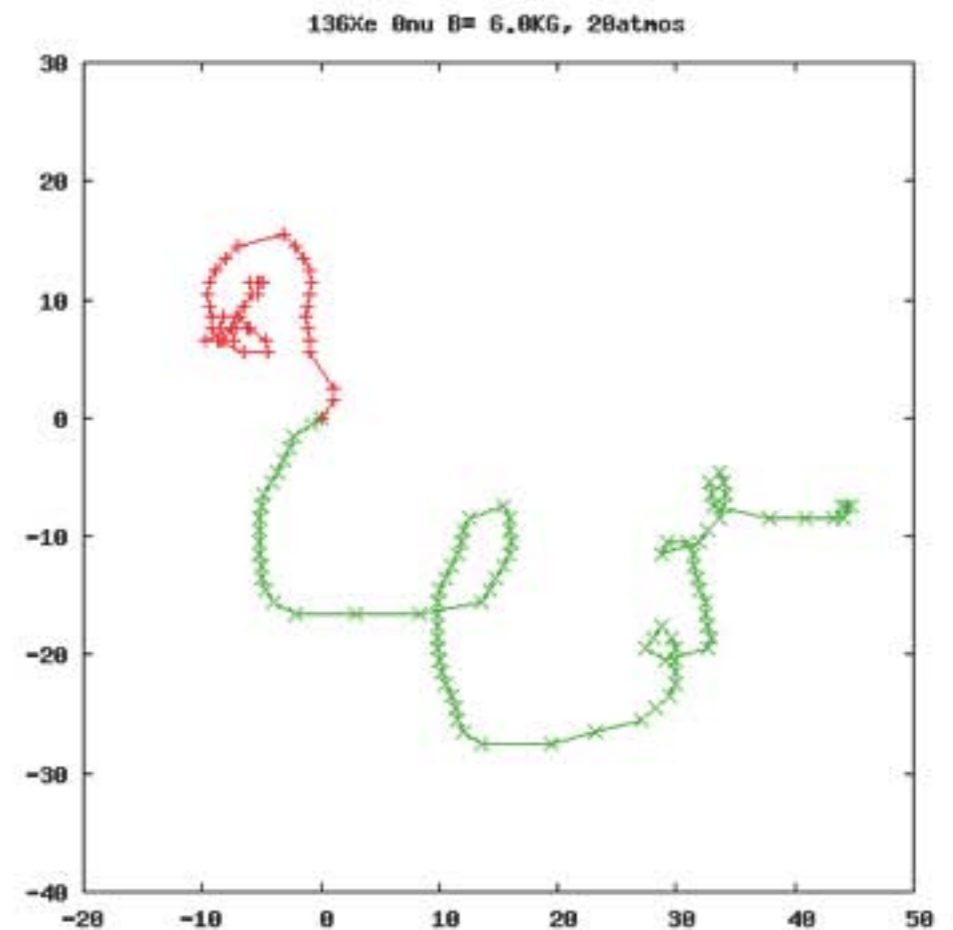
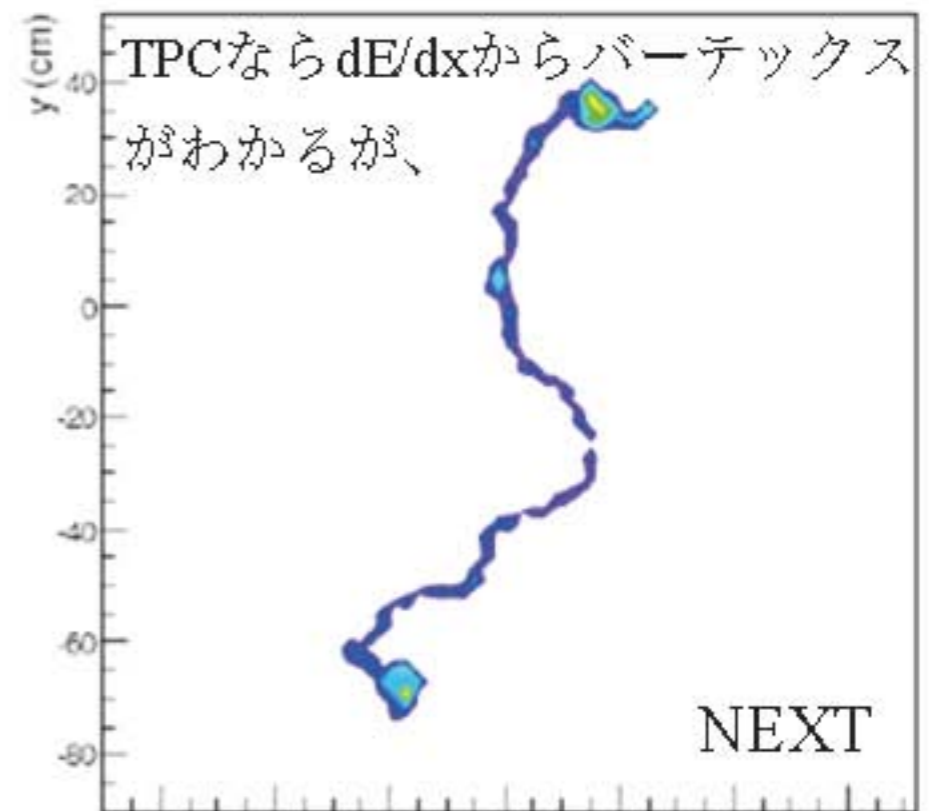
角分布を測定

# キセノンガス利用の可能性

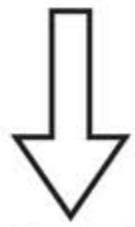
## Conceptual design of XeMTD



Ishihara @DBKK2010



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

$^{10}\text{C}$  negligible

30m depth → ~15wt%

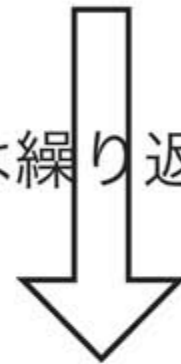
$^8\text{B}$  solar- $\nu$  1/5

KamLAND2

KamLANDi

Super-Kamiokande

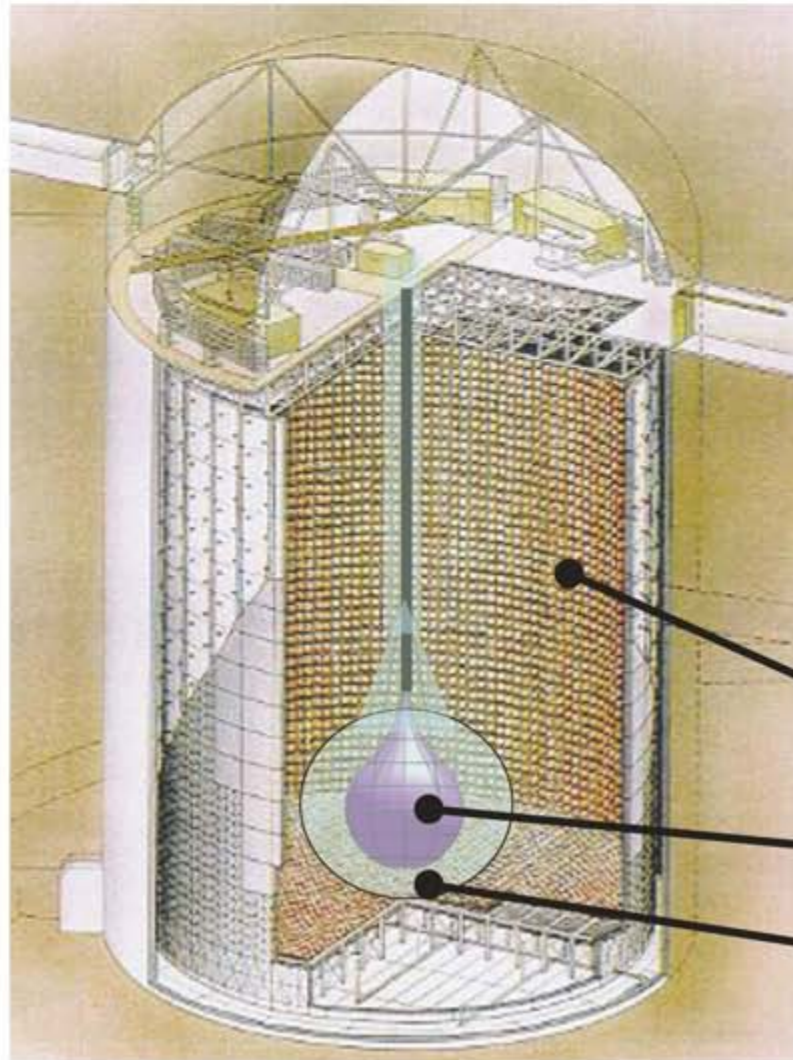
歴史は繰り返すか？



Super-KamLAND-Zen



Hyper-Kamiokande



>10,000kg enriched  $^{136}\text{Xe}$

~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、ニュートリノレス2重ベータ崩壊探索においても大きな展開が期待できる。
- 新たな発見や技術的なブレークスルーが得られた際は、凝った検出器であっても定まった目標に向かって大型化に取り組める。他核種も角度測定も可能なはず。ただし、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。