# KamLAND2-Zen



Zen =  $\underline{Ze}$ ro <u>n</u>eutrino double beta decay experiment

CRC将来計画タウンミーティング 第4回 ~地下非加速器実験分野~ 2012年7月22日





関係しているかもしれない。





質量を持つニュートリノにはカイラルパートナーが存在する。



マヨラナニュートリノの特徴

- レプトン数と"B-L"を破る←スファレロン過程を生き残るのに必要
- ●重いニュートリノ(大統一スケール近く)を自然に導入できる

シーソー機構で"有限だが軽いニュートリノ質量"を説明できる。  $L_{\text{mass}} = -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \overline{(\nu_L)^c} & \overline{N_R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & m_D \\ m_D & M_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L \\ (N_R)^c \end{pmatrix} \rightarrow m \sim \frac{m_D^2}{M_R}$ 

 重いニュートリノのCPを破る崩壊で"宇宙物質優勢"を説明できる。 (レプトジェネシス理論) Straight forward method to verify Majorana nature



数十の原子核が二重β崩壊する。

2つのニュートリノが、フェムトメート ルの空間に作られ反応が増幅される。



1930 light neutral particle (W.Pauli)
1933 neutrino, beta decay theory (E.Fermi)
1935 double beta decay (M.Goeppert-Mayer)
1937 Majorana neutrino (E.Majorana)
1939 neutrino-less double beta decay (W.Farry)





KamLAND-Zen が挑む宇宙・素粒子の大きな謎 ●ニュートリノのマヨラナ性 未知の重いニュートリノ  $\nu = \nu$ ニュートリノが軽い謎を究明 を自然に導入できる。 ●レプトン数の破れ スファレロン過程を生き残 宇宙物質優勢の謎を究明 & (B-L)の破れ る。 mass structure ニュートリノ質量構造 ●ニュートリノ質量絶対値 → degenerated normal inverted 究明で最重要 マヨラナ質量機構を仮定  $\Delta m^2$ 背景となる物理を特定するには、角分 布やエネルギーの分配測定、多核種で  $\delta m^2$ の測定が必要 particle mass big bang .000.000.001 .000.000.000 なぜニュートリノ b d⊷ s⊷ なぜ反物質が無く物質が antineutrinos are extraordinary light particle は軽い? particle  $(\nu_3) < \nu_1 < \nu_2 < (\nu_3)$ 生き残った? e (シーソー機構) now (レプトジェネシス理論) ΤeV 7 В Ð ke∨ Me∨ Q matter Ð < Φ Φ 大統一理論? < light

#### ニュートリノを伴う二重β崩壊と伴わない二重β崩壊

## KamLAND-Zen



~320kg 90% 同位体濃縮 <sup>136</sup>Xe を導入 将来800kg~1000kgに拡張



#### KamLANDを使うメリット

- 稼働中の装置
  - → 相対的に低コストで迅速に開始可能
- 巨大かつ清浄 (1200m<sup>3</sup>, U: 3.5x10<sup>-18</sup>g/g, Th: 5.2x10<sup>-17</sup>)
  - → 外部の放射線が問題にならない (Xe とミニバルーンには高清浄が必要)
- (必要時は低コストで) Xe含有液体シンチレータの純化、 ミニバルーンの換装が可能
  - → 拡大も容易 (数トンのXeにも対応可能)
- β,γを漏らさず観測
  - → バックグラウンド識別が相対的に容易
- 反ニュートリノ観測を並行できる
   → 原子炉停止時の良質の地球ニュートリノデータ

#### KamLAND-Zenの目標設定



検出器構成	Xe量	開始可能時期	到達予定感度	KKDC クレイム	縮退 構造	柳田 予測	SKデータ 逆階層構造	標準階層構造	暗黒物質 第4世代ニュートリノ
KamLAND-Zen	320kg	進行中	80meV (2年)	Ô	$\bigcirc$	×	×	×	$\bigtriangleup$
KamLAND-Zen	700~800kg	2013~	40meV (5年)	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	×	$\bigtriangleup$
KamLAND2-Zen	1000kg	2014, 2016~	20meV (5年)	Ô	$\bigcirc$	Ô	$\bigcirc$	△要新技術	$\bigcirc$

## mini balloon fabrication

produced in a class 1 super-clean-room (class 1 = less than  $1 \ 0.5 - micron - particle$  in cubic feet)

 $\rightarrow$  25 µm Nylon6 less material transparency 99.4% @400nm strength 19.4 N/cm Xe barrier < 220 g/year

low radioactivity  $\rightarrow$  specially made no filler film : 150  $\rightarrow$  2x10<sup>-12</sup>g/g U Th : 59  $\rightarrow$  3x10<sup>-12</sup>g/g  ${}^{40}\text{K}$  : 140  $\rightarrow$  2x10<sup>-12</sup>g/g

gores from the film



developed heat welding

All tools and parts to be used for the installation have been cleaned here.

film part(~6m)

corrugated tube(7

テフロン用 (ミー5、2001

6X7000 >3&Y-11

cone

3.16m

24 aores

Installation in a class 10~100 clean room built at the top of KamLAND

#### balloon and corrugated tube deployment



#### balloon went through the black sheet

mini-balloon surface

welding lines

supply tube

mini-balloon inflated with dummy LS and then replaced with Xe-loaded LS density tuning finished and tubes to be extracted



Normal data taking has been started on September 24th, 2011. only two years from the first budgets in FY2009

# **Energy Calibration**



#### Data from the initial 3month

2011 10/12~2012 1/2 total livetime 77.6 days 27.4kg-yr exposure of <sup>136</sup>Xe



peak at  $0V2\beta$  (Q=2.458MeV) !!!?

15

### Measurement of the $2v2\beta$ half life



### **Background situation**

#### Peak fit with 0v signal



Peak position is different from that of expected 0V. 0V only is rejected at more than  $8\sigma$  level.

17

放射性不純物



2つの可能性:

- ・
   <u>放射性不純物</u>なら長寿命なはず。
- <u>宇宙線による原子核破砕</u>ならミューオンとの相関がみえるはず。

thousands of millions of BNSDFの全原子核の崩壊を調査。

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

100秒以下の時間相関を <0.007 /ton・day (90% CL). → small

I00秒~30日の時間相関を持つものは、A,Zの近い原子核の エネルギースペクトルを調査して制限 → negligible

核反応 (α, γ), (α, αγ), (n, γ) はどれも断面積が小さい。 → negligible

30日以上の寿命で 0v に近いピークを作るものは、4つの候補。

<sup>110m</sup>Ag (T<sub>1/2</sub>=250d), <sup>208</sup>Bi(3.68×10<sup>5</sup>y), <sup>88</sup>Y(107d), <sup>60</sup>Co(5.27y)



GEANT4 はオーダー評価には十分使える。

地下での原子核破砕は小さい。 (GEANT4)



Estimated <sup>110</sup>Ag production rate (aboveground) is ~30/day/400kg-<sup>136</sup>Xe Measured BG rate (underground) is ~3/day/300kg-<sup>136</sup>Xe

## Limit on the $0v2\beta$ half life



 $(\chi^2 \text{ at } 2.2 \sim 3.0 \text{MeV})$ 

	χ² 78days	χ² 112days				
simul. fit	12.4	11.6				
0v+ <sup>110m</sup> Ag	16.5	13.1				
0v+ <sup>208</sup> Bi	15.8	22.7 🛆				
0v+ <sup>88</sup> Y	16.7	22.2 🛆				
0v+ <sup>60</sup> Co	65.0	82.9 🗙				
0v only	64.5	85.0 ×				
BG is likely to be <sup>110m</sup> Ag						

 $T^{0v}_{1/2} > 5.7 \times 10^{24} \text{ years at 90\% C.L. (78days)} \\ factor 5 \text{ improvement from DAMA} \\ T^{0v}_{1/2} > 6.2 \times 10^{24} \text{ years (KL-Zen 112days)} \\ (\text{ref. current best is 16 \times 10^{24} years from EXO-200)} \\ (R)QRPA (CCM SRC) \\ Phys.Rev.C79,055501(2009) \\ \langle m\beta\beta \rangle < 0.26 \sim 0.54 \text{ eV} @90\% \text{ C.L}_{18} \\ \end{cases}$ 

stable in time, but no strong discrimination yet

#### Limits on Majoron emitting double-beta decays





[8]Phys.Lett.B372,8,(1996), [12]Phys.Rev.C79,055501(2009), [13]Nucl.Phys.A818,139(2009)

#### Excluded region for the ordinary Majoron emitting decay (n=1)



KamLAND-Zen excludes the gap region of 2x10<sup>-5</sup> to 9×10<sup>-5</sup>, and entire region above 4×10<sup>-7</sup> is excluded in combination with the SN1987A limit.

"Ordinary Majoron emitting-decay" is much slower than

"light Majorana neutrino (>20meV) exchange"

### KamLAND-Zenのライバルとの競争状況



# Upper Limits on $0\nu\beta\beta$ Decay

Nucleus	Experiment	Exposure (kg-yr)	T <sup>0v</sup> 1/2 limit (yr) @ 90% C.L.	<m<sub>ββ&gt; (eV)</m<sub>
<sup>48</sup> Ca → <sup>48</sup> Ti	ELEGANT VI	0.025	> 5.8 × 10 <sup>22</sup>	< 3.5-22
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	<b>Heidelberg-Moscow</b>	35.5	> 1.9 × 10 <sup>25</sup>	< 0.35*
$^{82}Se \rightarrow ^{82}Kr$	NEMO-3	6.3	> 1.5 × 10 <sup>22</sup>	<1.5-3.1
$^{96}\mathrm{Zr} \rightarrow ^{96}\mathrm{Mo}$	NEMO-3	0.031	> 9.2 × 10 <sup>21</sup>	< 7.2-19.5
$^{100}Mo \rightarrow ^{100}Ru$	NEMO-3	6.3	$> 2.7 \times 10^{22}$	< 0.8-1.2
$^{116}Cd \rightarrow ^{116}Sn$	Solotvina	0.14	$> 1.7 \times 10^{23}$	< 1.5-1.7
<sup>128</sup> Te→ <sup>128</sup> Xe	(Geo chemical)	-	$> 7.7 \times 10^{24}$	< 1.1-1.5
<sup>130</sup> Te→ <sup>130</sup> Xe	CUORICINO	19.75	$> 2.8 \times 10^{24}$	< 0.30-0.71
$^{136}Xe \rightarrow ^{136}Ba$	KamLAND-Zen	38.5	$> 6.2 \times 10^{24}$	< 0.26-0.54
	EXO-200	32.5	> $1.6 \times 10^{25}$	<0.14-0.38
$^{150}Nd \rightarrow ^{150}Sm$	NEMO-3	0.093	> 1.8 × 10 <sup>22</sup>	< 4.0-6.3

\*but claim of signal by part of the Heidelberg-Moscow group (KKDC claim)

 $T^{0v}_{1/2} = 2.33^{+0.44}_{-0.31} \times 10^{25} \text{ yr}$  <math display= 0.18-0.43 eV @ 2 $\sigma$  C.L. (QRPA model)

Sensitivities of running experiments are close to KKDC signal

→ <sup>76</sup>Ge (GERDA), <sup>130</sup>Te (CUORE), <sup>136</sup>Xe (EXO, KamLAND-Zen)











# 低原子炉運転期間の 地球ニュートリノ観測

目標

U,Thの分離測定

地球内原子炉への制限

マントル内の極端な分布に対する制限

(方向測定)



### 地表での熱流測定





宇宙化学:エンスタタイトコンドライト: Javoy et al., 2010:9-13 TW 地球化学:初期マントル岩石学:Palme & O'Neill, 2003:18-24 TW 地球物理:マントル対流:Turcotte et al., 2001:27-35 TW





ウラン、トリウム、カリウムなどは崩壊によってエネルギーを生成し、反電子 ニュートリノも放出するので、反ニュートリノ流量から熱生成量がわかる。

カムランドは、ウラン、トリウムからの反電子ニュートリノに感度がある。

#### 2005年には、地球反ニュートリノを観測できることを実証

KamLAND collaboration, "Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND" Nature 436, 03980 (2005)

地球ニュートリノの観測結果



#### 地熱への換算



観測結果と地球参照モデルは良く一致

放射性地熱合計21兆ワット

地熱全てを放射性熱とするモデルを98.1%以上の信頼度で排除

地球反ニュートリノ観測で放射性 物質起源の熱生成量測定に成功 (地球モデルを裏付け) ☆地球科学の

5大問題のひとつを解決



「地表での熱流量」―「放射性熱生成」 ↓ 「原始の熱」

地表での熱流量の全てが放射性物質起 源では無いことを証明、原始の熱が残 存し徐々に冷える地球を示した。

# 5 Big Questions: Prof. McDonough in Neutrino 2008



ニュートリノ観測が全ての鍵をにぎっている。

### 今は原子炉ニュートリノがほとんど来ない



原子炉がほぼ停止している現状は地球ニュートリノ観測に適している。 ただし、1月あたり1事象程度なので、継続的な観測が必要。

U,Th の分離測定や地球内原子炉への制限 マントル対流は一層か二層か?などの解明を目指す。

 ・ ・ ・ 市 が 生 ・ 下層マントルに し・ 下層マントルに し・ 下層マントルに し・ 市 が 集中で連鎖核分裂の可能性 地球物理学者の主張 ・ 地球物理学者の主張

## 極低放射能環境としてのカムランド

U: <3.5x10<sup>-18</sup> g/g, Th: <5.2x10<sup>-17</sup> g/g



### DM-Ice計画



現状Nal 純度: U,Th 50ppt相当程度~I0×DAMA

## KamLAND-PICO計画

~1000kg Nal(Tl) @ the center of KamLAND2

U,Th 10<sup>-17</sup>~10<sup>-18</sup>



徳島大実績:U I.Ippt,Th 0.6ppt <sup>210</sup>Pb純化 I/I0必要(るつぼ改良予定)







5

6

7

#### p(60MeV)+<sup>9</sup>Be→<sup>8</sup>Li+2p +中性子多数 n+<sup>7</sup>Li(遮蔽材)→<sup>8</sup>Li <sup>8</sup>Li $\rightarrow$ <sup>8</sup>Be+e<sup>-</sup>+ $\overline{\nu}_e$ 2.6×10<sup>22</sup>/year





Relative

۷e

Flux



### KamLAND2への改造にかかるコスト(概算)

#### <sup>136</sup>Xe調達量 平成23年まで調達分 430kg 現行計画 700kgまでのこり4.3億 1000kgまでのこり4.7億← 将来計画 消防の点検に同期すれば最小の KamLAND2への改良に必要なもの 停止時間で効果的に改良可能 LAB油 3000m<sup>3</sup> 6億 発光材 (PPO) 1億 10億 1億 蒸留装置強化(LAB油に対応するため) 1億 新規バルーン 1億 集光ミラー 汎用化で必要となるもの 床補強、クレーン強化、 クリーンルーム、チムニー拡大 1億 3.5億 0.5億 低放射能空気改修 2億 電子回路(長期運転のため) 消防法にかかる点検(2015~16外側からの点検)関係 1.2億 外槽PMT 故障したものの交換 0.7億 水漏れ補修または純水装置補強 0.5億 内側からの点検(液体シンチレータを全て廃棄する必要有り)は消防との折衝で回避できた。 ただし、2016.6迄に外側からの点検(外水槽を空にする必要有り)が必要である。

まとめ

- ・ニュートリノのマヨラナ性の検証は、ニュートリノ質量機構・質量構造・
   宇宙物質優勢とも関連し重要な課題
- ・KamLAND-Zenは、開始間なしで世界的な競争に参入(現在純化中)、
   柳田予測の検証程度の感度を目指す。
- ・逆階層構造カバーには、エネルギー分解能の向上が必要(KamLAND2-Zen)
- ・原子炉がほぼ停止している現状は、地球ニュートリノ観測に有効(併存可能) U, Thの分離測定、極端なマントル非一様性、地球内原子炉の探索を目指す
- ・KamLANDを利用した、暗黒物質研究(DAMA/LIBRAの検証, KamLAND-PICO)や第4世代ニュートリノ探索(Ce-LAND, IsoDAR)、その他多種の 原子核での二重β崩壊研究(CdWO4結晶, CaF2結晶, Nd-LS)などの継続的 かつ多様な研究計画が進行中(導入部拡大が重要 → KamLAND2)