

極低放射能環境での ニュートリノ研究

平成30年10月20日 CRC将来計画タウンミーティング

井上邦雄 東北大学ニュートリノ科学研究センター



2010年9月16日 CRC将来計画シン ポジウムで、「カムランドの将来計画」 として取り上げたこと



原子炉ニュートリノ 原子炉が停止してしまった。

さらなる精密化 → ほぼ達成

質量階層性測定の可能性 → JUNOに任せる。

地球ニュートリノ 原子炉停止をチャンスに変える。

高精度化 → 単なる熱測定を<mark>達成し、地球モデルの検証に</mark>進めそう。KL2にも期待 方向測定の可能性 → 継続しているが。。

太陽ニュートリノ

⁸B → 2MeV閾値ができそう。

→ 1.5MeV閾値 KL2に期待

⁷Be → <mark>達成</mark>

pep/CNO → KL2に期待

Borexinoは小さいので3MeVまで

課題:¹⁰C,¹¹Cタギング

課題:¹¹Cのマルチバーテックス識別

課題:²¹⁰Bi(²¹⁰Pb)低減

課題:¹¹C、²¹⁰Bi(²¹⁰Pb)

太陽組成問題は未解決

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 当時まだ始まっていませんでした

当時、メリットを挙げて競争力を主張 達成度を紹介します。 さらに高エネルギー分解能化(KL2)を提案 変わらず今日の主題

KL2での暗黒物質探索

NalでDAMA/LIBRAの検証 → 徳島大を中心に高純度Nalを開発中 CANDLES, ¹¹⁶CdWO₄で二重ベータ崩壊

超新星ニュートリノ 残念ながらまだ銀河中心で爆発していません。 ニュートリノ陽子コヒーレント散乱で温度・明るさの同時測定

核子崩壊

n→invisible τ>5.8×10²⁹y PRL 96, 101802 (2006) PDGより3桁上?? p→K ν τ>5.4×10³²y Phys. Rev. D92, 052006 (2015) (SK τ>5.9×10³³y)





地球ニュートリノは地熱を反映 $^{238}U \rightarrow ^{206}Pb + 8^{4}He + 6e^{-} + 6\bar{\nu}_{e} + 51.7 \text{ MeV}$





最初の地球ニュートリノのアイデア

101

commi

write to me at : The Union

Yorn GOO.

Univ of Mich. Ann Hybry. Mich

Dear Fred

1953年 G.Gamow が F.Reinesへの手紙で原子炉ニュートリノ観測のBGとして指摘

1956年 最初のニュートリノの発見 → ノーベル賞(1995)

FROM MUNICIPAL IN WRITE BOOK ON THE PLANETS, BOUTLIBRIUM FRAT LODE FROM MARTE'S SURFACE IS 50 MROS/CH²EEC. IF ABBUME ALL DUE TO MESSAGE NETA DECAY THEN HAVE ONLY ENGINE ENGINE FOR ABOUT 108, 15 Nov NEWTEN ON THE ON THE AND SEC. THE IS LOW BY 10⁵ OR SO. BALF LIVES WOULD BE MADE BY COGNEC BAYS OR MENTRONS IN EASTER. IN VIEW OF RARITY OF COSMIC RAYS! L.R. ABOUT EQUAL TO RECENT STARLIGHT AND OF NEUTRONS IN MARTH THIS BOUNCE OF MEUTRONS SEIMS XVIN LINS LINKLY AS A SOURCE OF GUE SIGNAL.

> F.Reinesはすぐさま地表の熱流50erg/cm²/s から考えてあり得ないと返事

かつては不可能と考えられていた。

世界初の地球ニュートリノの観測結果 2005年 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)

地球ニュートリノ観測数 28 ± 15 ²³⁸U, ²³²Th 積分 $\bar{\nu}_{e}$ 流量 $6.6 \pm 3.5 \times 10^{6} / \mathrm{cm}^{2} / \mathrm{sec}$

世界初のニュートリノ観測(1956)



世界初の地球ニュートリノ観測(2005)



Poltergeist 1400リットル液体シンチレータ

地下 12m

1200m³液体シンチレータ

地下 1000m + 極低放射能

```
桁違いの進化
```



KamLAND collaboration, "Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements", nature geoscience 4, 647-651 (2011)

最近の地球ニュートリノ観測

原子炉停止期間の良質な地球ニュートリノ観測データを蓄積している。

新学術領域「核-マントル共進化」に参加し、地球化学者・地震学者・ニュートリノ研究者の連携で地球モデルの構築を実施、またニュートリノの方向測定のための開発を行っている。

東京大学地震研究所と、素粒子地球科学推進のための**部局間協定**を維持し、共同利用研究にも 採択されている。

宇宙創成物理学国際共同大学院で地球化学の専門家(W.F.McDonough)をメリーランド大学から 招聘し、学際分野ニュートリノ地球物理を推進している。

安定観測のための光電子増倍管の延命処置を実施し、4年以上運転できる目処がついた。



地球ニュートリノ観測の現状



地球内部のダイナミクスや地球始原隕石に対する知見を得始めている。

神岡の地理的特徴を生かした観測を継続した上で、海洋底への展開で中核となることも可能。

標準理論で説明できない



暗黒エネルギー 68%

to

TeV

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つ以上の自由度を必要とする。



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つ以上の自由度を必要とする。



とても重く未発見

 $\nu = \nu$

マヨラナニュートリノはレプトン数を破る

観測できないだけ

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



Asymmetric Dark Matter (Leptogenesisでの暗黒物質)



ニュートリノと反ニュートリノが同じなら、、、

マヨラナ性の単純な検証案



超新星爆発の中でもなければ ニュートリノ同士をぶつける なんて無理!!

非現実的!!

幸い自然は親切で、

数十の原子核が二重β崩壊する。





マヨラナニュートリノならば

ニュートリノが出てこない2重ベータ崩壊(0v2β) が可能



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.Furry)

W.Furry



0v2βは、マヨラナ有効質量が 大きいほど発見しやすい。 Majorana CP $\langle \mathbf{m}_{\beta\beta} \rangle = |\Sigma \mathbf{m}_{i}| |U_{ei}|^{2} \varepsilon_{i}^{\prime}$ $\frac{1}{T_{1/2}} = G_{0\nu} |M_{0\nu}|^{2} \langle m_{\beta\beta} \rangle^{2}$

0ν2β実験のマイルストーン



<1 meV 相当困難

Strategy

現状: いつ見つかっても不思議でない。

● 最先端の感度を維持し続け、まず発見をめざすことが重要。
 ○ 現在は確実な技術でスケーラビリティーを確保

● 0ν2β発見が無くても価値の高いプロジェクトとするためには、

- 逆階層構造をカバーする感度が重要。
 - ・宇宙観測、ニュートリノ振動と矛盾したら → ニュートリノはディラック
 ・ニュートリノはマヨラナと信じれば → 消去法で標準階層構造

○ 多目的にし、堅い成果も用意する。

● Oν2β発見が発見されたなら、

○ 高精度測定

- 他核種での測定 → 核行列要素の不定性低減、背景物理の選別 技術の多様性
- トラックの測定 → 背景物理の選別 技術の多様性
- 宇宙観測やβ崩壊との統合解析 → 背景物理の選別、マヨラナCP測定も視野に

Current world best limit from **KamLAND-Zen**





Advantages of KL-Zen

(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)

ミニバルーン試作とプールでの導入リハーサル





25ミクロン厚ナイロン6での試作





水深8mのプールで導入テスト



バルーン吊下部



80ミクロン厚ポリエチレンでの試作



導入、膨張、液の入れ替え方法を確立

キセノン取り扱い装置







本番用ミニバルーン製作

小物質量 → 25 µm厚 ナイロン6 透明度 99.4% @400nm 強度 19.4 N/cm Xe 透過度 < 220 g/year 低放射能 → 充填剤無し特注フィルム U : 150 → 2x10⁻¹²g/g Th : 59 → 3x10⁻¹²g/g ⁴⁰K : 140 → 2x10⁻¹²g/g











minimum inactive detector material basically $25 \,\mu$ m-t balloon film only

KamLAND-Zen started in 2011 特推FY2009-2013 ① low cost and quick start 新学術FY2014-2018 purification & double size



Unexpected BG has found

KamLAND-Zen Phase I (320kg xenon loading)





KamLAND-Zen Phase II (380kg xenon loading)



What KLZ has claimed as advantages are all demonstrated;

O low cost and quick start (running detector) 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)



~Cleaner and Larger~





cleaning, cleaning, cleaning!!!





~example of improved operation~

before



after





群がらない!? ゴーグル 溶着機の導入 カバーシート 二重手袋 半日毎に洗濯

クリーン下着着用





after Leak check and repair





New mini-balloon has been deployed and inflated with "dummy" LS in August 2016 spent 1+α yrs in total

through characterization of mini-balloon

Measures we took worked!

We confirmed that the mini-balloon is cleaner !!

preliminary x1E-12 g/g_{film} ²³²Th 238 2 Target 洗浄直後 6 This time* 31+-7 5.3 + -0.8~1/10 Zen 400 1st 14 + -179+-3 Zen 400 2nd Yes, cleaner! 336 + -246.1 + -4

At the same time, we noticed;

Indications of leak;

- \cdot camera image
- \cdot load cell
- balloon shape reconstruction with ²¹⁰Po events
- ²²²Rn decay rate
- mixture of KL-LS and dummy-LS by gas-chromatography







after 1.5 yrs of effort mini-balloon installation May 10, 2018



50cm width for detector access



Dummy LS filling

Dummy LS = non Xe loaded LS



After 30.5 m³ LS filling, we started DAQ to investigate background status of LS and mini-balloon

Dummy LS filling

Dummy LS = non Xe loaded LS



After 30.5 m³ LS filling, we started DAQ to investigate background status of LS and mini-balloon

Simulation, mini-balloon stays as expected



- V no evidence of leakage
- V ²³⁸U is low enough ₂x4 ⁸BνBG
- **!?** ²³²Th(~10⁻¹⁵g/g) tolerable but..

¹⁰C is x2 of ⁸B ν , but new analysis looks promising. We chose purification! 41

World-leading KamLAND-Zen

予算要求の概要・スケジュール

KamLAND2-Zen Winston cone (集光ミラー)

導入部拡大 5トン程度の釣り下げ能力

1000kg 濃縮キセノン

光被覆率 > x2 光収集量 > x1.8

液体シンチレータ改良

カムランド液体シンチレータ 8,000 光子/MeV 標準的な液体シンチレータ 12,000 光子/MeV X1.4

高量子効率PMT

 $17'' \Phi \rightarrow 20'' \Phi$, $\epsilon = 22\% \rightarrow 30+\%$

x1.9

目標 σ (2.6MeV)= 4% → < 2.5% ^{単純計算 < 2%}

逆階層構造をカバーする

目標感度 ~20meV/5年45

KamLAND2に向けた技術開発例

R&D for KamLAND2-Zen and future

Poly Ethylene Naphthalate (PEN)

welding easier & strong enough

KamLANDはマルチパーパスも特徴

〇超長基線(韓国)原子炉ニュートリノ振動研究(国内原子炉停止中は可能)

○太陽⁸BニュートリノでのMSW物質効果の検証(新型電子回路と長期観測)

○太陽CNOサイクルニュートリノの観測(さらなる低放射能化と新型電子回路)

〇ニュートリノと反ニュートリノの振動の比較でCPT破れを検証(国内原子炉の再稼働)

○J-PARCニュートリノを使った物理研究(新型電子回路と長期観測)

○キセノンを使った特徴的な暗黒物質探索(さらなる低放射能化)

特徴的な超新星ニュートリノ観測

展開の可能性

DANSS実験

KamLANDを使うIsoDARの場合

Sterile neutrino search (IBD sample)

Sterile neutrino precision measurement

DAMA/LIBRA @GranSasso

Significant modulation $(12.9\sigma, +/-2\%)$ over 20 years!!

8000 Time (day)

53

KamLAND-PICO

- ~1000kg Nal(Tl)
- @ the center of KamLAND2
- U,Th 10⁻¹⁷~10⁻¹⁸ g/g

DAMA/LIBRAより4~5桁環境バックグラウンドが少ない 搬入口の改造が必要

2つの主要な研究課題とマルチパーパスで極低放射能研究を推進します。

1. ニュートリノのマヨラナ性検証による宇宙・素粒子の大問題への挑戦

ニュートリノ質量の発見により、ニュートリノがディラック粒子であるかマヨラナ粒子 であるかの検証が重要となっている。マヨラナ粒子の場合は、シーソー模型やレプトジェ ネシス理論により、「ニュートリノが軽い謎」「宇宙物質優勢の謎」解明の糸口となる。

マヨラナ性の現在現実的な検証方法は「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索」 のみであり、その研究でカムランド禅が世界を大きくリードしている。

発見を目指しつつ逆階層構造をカバーし、複数の理論モデル検証・質量階層構造の究明 を行う。

2. 地球ニュートリノ観測によるニュートリノ地球科学の展開

ニュートリノ地球科学を創出したカムランドは、国内の原子炉停止以降良質のデータを 蓄積しており、世界をリードする観測装置として地球のダイナミクスや始原隕石などの重 要な知見をもたらしつつある。

総続的な観測とカムランドの高性能化によって、地球の形成・ダイナミクスの理解を深 めるニュートリノ地球科学が展開する。

引き続きご支援をお願いします。

分野の位置付け

地下での素粒子原子核研究は、

国内の宇宙線研究、高エネルギー物理学研究、原子核研究コミュニティにおいて継続 的に重要分野として取り上げられており、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の 探索と暗黒物質の直接探索がこの分野の最重要課題である。 カムランド禅は現在、世界を圧倒的にリードする実績を上げている。

欧米でも、

Long Range Plan for Nuclear Science (米国2015)で、ニュートリノを伴わな い二重ベータ崩壊の探索がトッププライオリティとしてあげらている。

European Astroparticle Physics Strategy 2017-2026においても、ニュー トリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索が重要課題として取り上げられ、発見まで継 続すべしとされている。

KamLAND国際共同研究への参加状況

東北大学、東京大学Kavli IPMU、<mark>京都大学</mark>、大阪大学、徳島大学、 MIT、ボストン大学、ノースカロライナ大学、デューク大学、TUNL、テネシー大学、 バージニア工科大学、ワシントン大学、カリフォルニア大学バークレー校、 ハワイ大学、アムステルダム大学