

KamLAND2-Zenに向けたシミュレーションおよび再構成ツールの開発

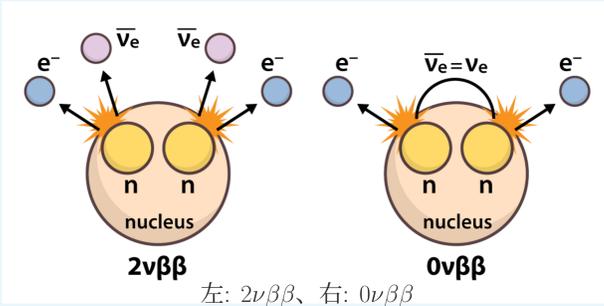
第2回学術変革「地下稀事象」若手研究会 / 第11回「極低放射能技術」研究会 2026年3月6日(金)

尾崎 秀義 (for KL collaboration, 共同研究: 梶田祥広 (東北大学 M2))

東京理科大学 創域理工学部 先端物理学科

① KamLAND2-Zenの概要

Zen : Zero-neutrino Double-Beta / ^{136}Xe (Xenon)



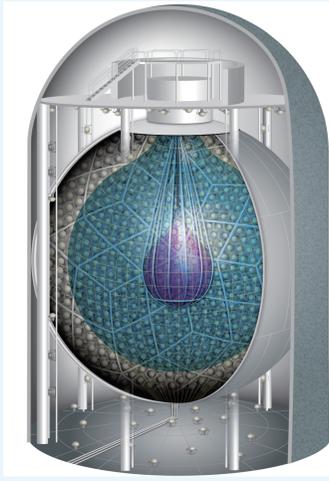
$0\nu\beta\beta$ の発見 ⇒ Majorana性の証拠・LNV

⇒ 物質優勢宇宙・シーソーによるνの軽い質量の手掛かり。

Zen800最新結果 (PRL 135, 262501 (2025)) :

$T_{1/2}^{0\nu} > 3.8 \times 10^{26} \text{ yr}$ (90% C.L.), $\langle m_{\beta\beta} \rangle < (28-122) \text{ meV}$

→ 世界で最も厳しい制限。



KamLAND (KL) : 神岡鉱山跡地・地下1000 m (2700 m.w.e.) の大型液体シンチレータ反ニュートリノ検出器。

KamLAND2 (KL2)

建設状況 : 2027年度データ観測に向けて現在建設中。

光量アップに向けた改善点 : High-QE PMT・集光ミラー、LSの純化・BisMSB入りXeLS+PENミニバルーン

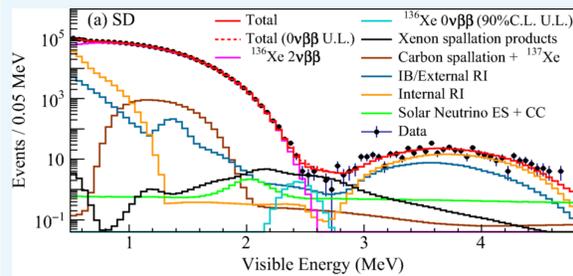
光量5倍 → $2\nu\beta\beta$ 染み出しを約1/100に低減!

RFSocエレキでのミュオン後データ取得改善

→ スポレーションタグ効率改善!

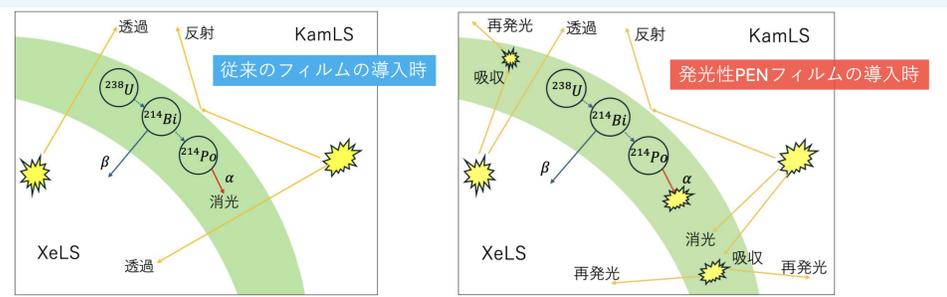
KL2-Zen目標 : $\sim 2 \times 10^{27} \text{ yr}$ (90% C.L.) を10年の観測で達成!

② KL-Zen800の背景事象とKL2-Zenに向けた課題



背景事象:

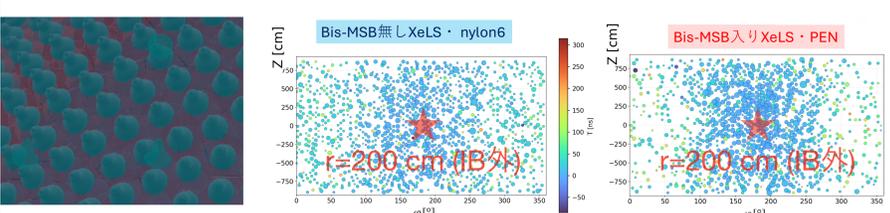
- ▶ $2\nu\beta\beta$: エネルギー分解能により染み出し抑制。KL2の光量増加が鍵。
- ▶ Xe スポレーション (LL): 長寿命、 β^+ /ガンマ線 → PIDが重要 (メインBG)。
- ▶ Bi^{214} IB: フィルム際でメインBG。遅延同時計測で除去 → PENフィルム。



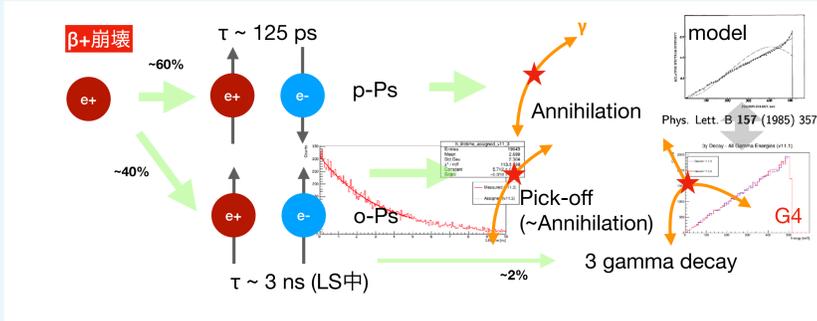
- ▶ PEN/Bisで光路が複雑化 → 物理モデルに依る Likelihoodでは限界。
- ▶ MLは複雑なタスクに最適! 複雑光学下でも頑健な再構成が可能。
- ▶ ただしMC精度とMLの堅牢性が重要課題。

③ KL2シミュレーションの開発

(A) ジオメトリ実装: 集光ミラー・BisMSB+PENなど新規構造を導入。



(B) 物理過程拡張: 物質ごとのo-Ps形成時間・形成率をモデル化し 3γ まで再現。→ 正しくo-Psの物理を扱えるようになった!

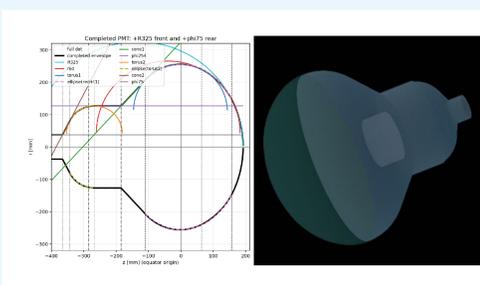
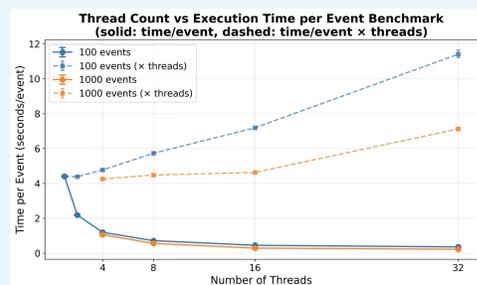


(C) 実行基盤:

マルチスレッド (MT) 化を行った! → 線形スケーリングを確認。

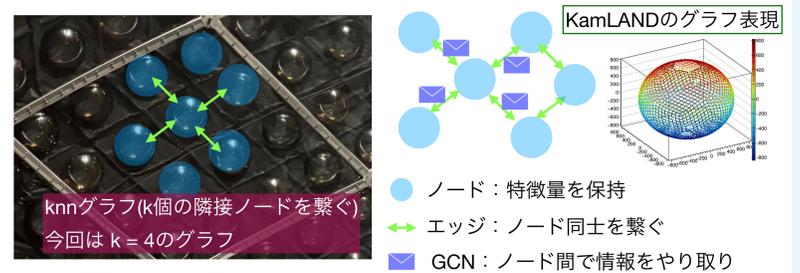
Opticks (GPU対応) も導入中 → PMTモデルを再定義、他も対応中。

PMTヒットモデルも改善 (ヒット場所依存のQE・TT/TTS、東北大B4の貢献)。

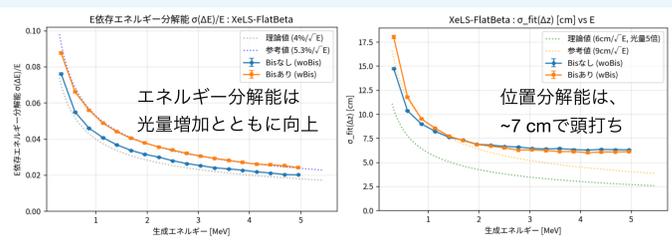


④ GNNを用いた事象再構成の開発

E・位置・拡がりの同時再構成。PMTの時空間相関をGNNで直接扱う。一様な位置・エネルギーのMCでトレーニング → 単一の位置・エネルギーのMCや $0\nu\beta\beta$ /LLのMCで検証。

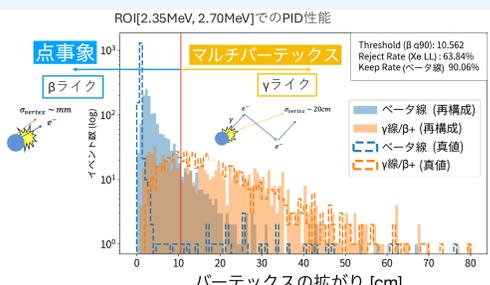


結果: PEN再発光下でもML再構成は機能! 光量増で分解能改善。



位置分解能の頭打ちを観測。 γ 飛程の影響と思われる (考察)。エネルギー損失重心の利用等で改善を検討中。

粒子識別(PID)の結果: LL reject 63.8% (Preliminary)、 β keep 90% (ROI)。イベントの拡がりという物理量に基づいたPIDを実証!



課題:

- ▶ o-Psの形成時間などの時間情報のインプットがない
- ▶ E・位置・拡がりの同時再構成のLoss設計を改善する
- ▶ データセット構成の工夫 (XeLS/KamLS比、 β/γ 比など)

⑤ まとめと今後の展望

まとめ

- ▶ KL2-Zenの評価基盤 (高精度MC・GNN再構成) が整った。
- ▶ 高速化に向けた開発が進行中 (MT化・Opticks・PMTヒットモデル)。

今後のTODO

- ▶ 光学パラメータ依存性の調査: BisMSBやPEN・LS等のパラメータ依存性の調査、ミスフィット検証: 外側イベントの内側染み込み、開発進行中: エレキシミュレーション、波形解析 (MC・ML両面)、multi-hit対応、実データでの検証。

Contact: h.ozaki@rs.tus.ac.jp

