

SK-GdにおけるAmBe線源を用いた中性子検出効率の評価



神戸大学 粒子物理学研究室
M1 西上真央

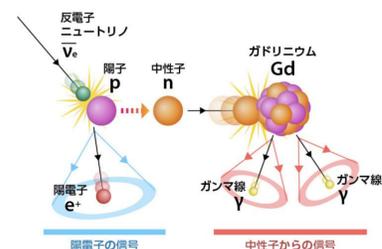
共同研究グループ

伊藤博士(神戸大学)、矢野孝臣(東大宇宙線研)、原田将之(東大宇宙線研)、関谷洋之(東大宇宙線研)、日野陽太(高工研)、小汐由介(岡山大学)、濱田紘希(岡山大学)、他Super-Kamiokande Collaboration

スーパーカミオカンデ (SK) 実験

SKは、有効体積22.5ktonの水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置である。
超新星背景ニュートリノの観測感度を改善させるため、2020年7月~濃度0.011%^[1]
純水中にガドリニウム(Gd)を添加(SK-Gd実験)した。2022年6月~濃度0.033%^[2]

e⁺, nの遅延同時計測で、反電子ニュートリノにおける逆ベータ崩壊事象を同定識別する。



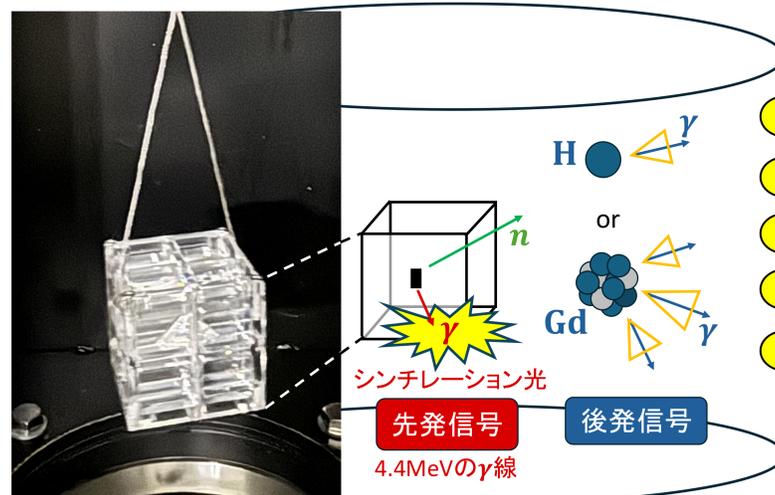
DSNB探索での信号選択における系統誤差^[3]

Cut	SK-VI	SK-VII
q ₅₀ /n ₅₀ cut	0.20%	0.25%
θ _C cut	1.3%	0.94%
MSG cut	1.7%	1.4%
Neutron tagging (NN/BDT)	8.4%/5.0%	3.4%/6.0%

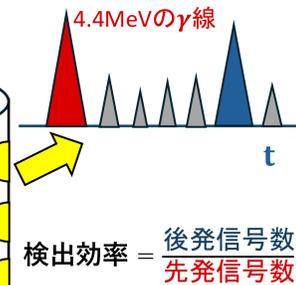
観測における系統誤差を抑制するため、中性子線源を用いた中性子検出効率の評価が重要である。

AmBe線源を用いた較正

²⁴¹Am-Be線源(AmBe)を、BGO結晶で囲った線源システムを用いる。



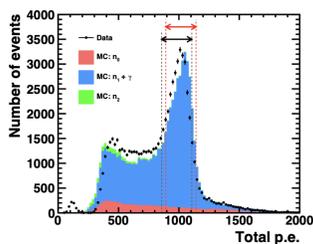
PMTからの信号:



測定データとシミュレーション(MC)を比較し、中性子検出効率を評価する。

解析手法^[4]

先発事象の選択

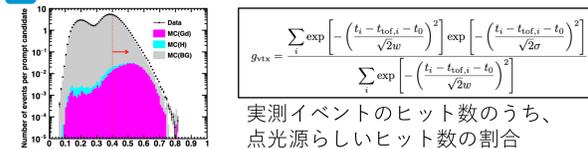


先発事象数:
(Peak-150) < Total p.e. < (Peak+100)

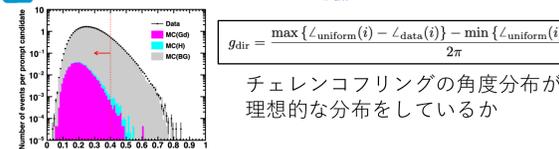
後発事象の選択

1 有効体積: 壁, 上下端面から2mを除いた内側領域

2 事象発生点再構成の確からしさ g_{vtx} > 0.4

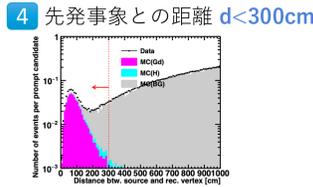


3 チェレンコフリング形状判別 g_{dir} < 0.4

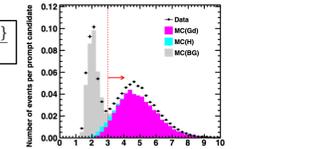


先発事象との距離 d < 300cm

4 先発事象との距離 d < 300cm



5 再構成エネルギー E > 3MeV

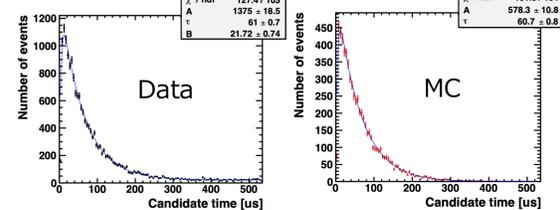


先発事象と後発事象の時間差分布

フィット関数: $f(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\mu}\right)\right] + B$

中性子捕獲 τ: 捕獲時定数

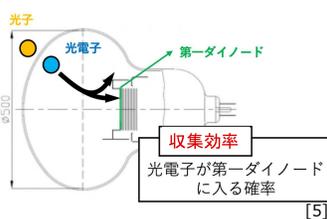
中性子熱化 μ = 4.3μs: 熱化時定数



後発事象数:
(5 < t < 535 μs の事象数) - (B × nbin) (5 < t < 535 μs の事象数)

磁気補償コイル断線

地磁気補償コイル: 地磁気の影響により、PMTの光電子収集効率(CE)が変化する影響を抑えるために設置されている。

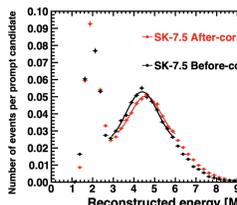


2023年に断線し、残留磁場の影響によりCEが変化したことでエネルギー再構成の結果も変化した。

各PMTに対し、故障前に対する故障後のヒット数の比を求め補正を行った。

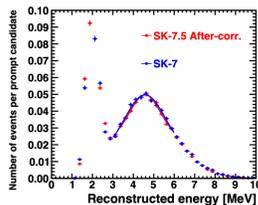
光電子収集効率(CE) 補正の結果を検証

コイル故障時においてCE補正前と補正後の分布



Mean値
SK-7.5 After-corr.: 4.57 ± 0.02
SK-7.5 Before-corr.: 4.39 ± 0.02

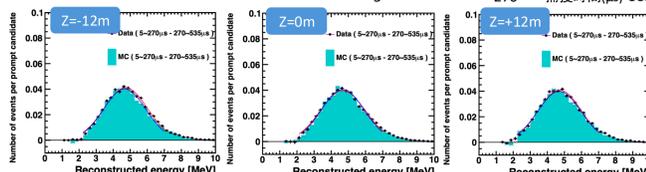
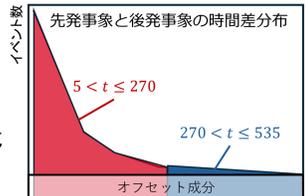
CE補正後でコイル故障前と一致するかどうか



Mean値
SK-7.5 After-corr.: 4.57 ± 0.02
SK-7: 4.58 ± 0.02
0.4%(1σ)以下で一致

残留磁場によるPMTの光電子収集効率の低下を補正できた。

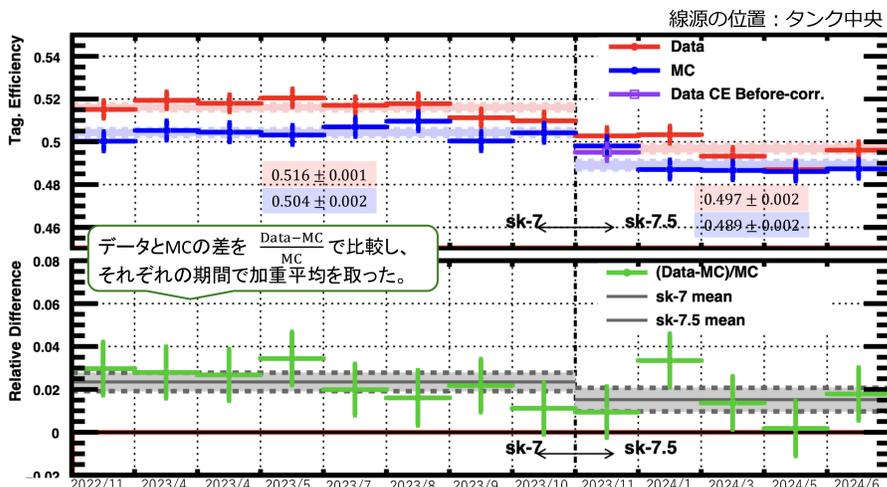
中性子捕獲時間について
5 ~ 270 μs の事象 - 270 ~ 535 μs の事象の差し引きを行うことで、オフセット成分を打ち消して再構成エネルギー分布を比較する。



ガウスフィット結果	Z=-12	Z=0	Z=+12
Mean(Data)	4.73 ± 0.01	4.68 ± 0.02	4.72 ± 0.02
Mean(MC)	4.68 ± 0.02	4.67 ± 0.02	4.70 ± 0.02

線源位置によらずMCが実データのエネルギー分布をよく再現している。

コイル故障前後で中性子検出効率の変化

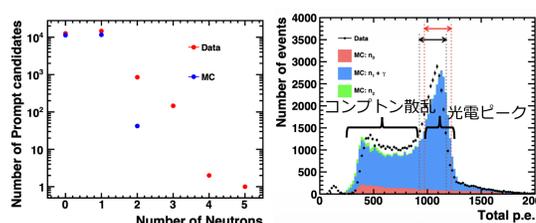


Ntag eff.	SK-7	SK-7.5	加重平均の結果、測定データとMCの差は
Data	0.516 ± 0.001	0.497 ± 0.002	
MC	0.504 ± 0.002	0.489 ± 0.002	SK-7 : 0.023 ± 0.004
(Mis-ID prob.)	(~2 × 10 ⁻³)	(~4 × 10 ⁻³)	SK-7.5 : 0.015 ± 0.006

線源データの中性子検出効率はコイル故障後3~4%ほど低下したが、コイル故障前と同程度の差で再現できた。

現在進めていること

Neutron Multiplicityについて



測定データとMCで異なる。コンプトン領域でも同じなのか、同じならそれを用いてMCを補正できないか?

系統誤差評価

中性子検出効率の測定データとMCの差の要因として、以下が考えられる。

- 事象選択による差
- MCに入れるパラメータによる差

測定データとMCでスケールが異なることにより事象選択範囲も変わってくるので、選択範囲を片方に補正して検出効率の変化を計算する。

また、MCではAmBe線源から中性子が放出する過程の分岐比を指定し重み付けしている。これを変化させて検出効率の変化を計算する。

まとめ

- SKでは超新星背景ニュートリノ探索感度向上のため、Gd濃度0.033%で観測を続けている(SK-Gd)。
- 磁気補償コイルが断線し光電子収集効率(CE)を補正した妥当性を、AmBe線源を用いた較正実験の解析結果を用いて評価した。
- コイル故障期間(SK-7.5)のエネルギー再構成について、コイル故障前を0.4%以下の違いで再現できた。
- SK-7.5のシミュレーションが測定データを再現できた。
- SK-7.5測定データの中性子検出効率を、SK-7と同等の精度で再現した。

参考文献

- SK, Nucl. Instr. Meth. A 1027 (2022) 166248.
- SK, Nucl. Instr. Meth. A 1065 (2024) 169480.
- K. Abe et al., arXiv: 2511.02222 (2025).
- 浅香 龍星, "スーパーカミオカンデ-ガドリニウム実験における Am/Be 線源を用いた中性子検出効率の測定", 修士論文, 東京理科大学大学院 創域理工学研究科 先端物理学専攻 (2025).
- 濱口 紘希, "スーパーカミオカンデにおける光電子増倍管の応答への地磁気の影響の評価", 日本物理学会第79回年次大会, 講演番号17aC214-6(2024).