

スーパーカミオカンデにおける陽子崩壊探索と大気ニュートリノ振動の最新結果

竹中 彰 (東京大学宇宙線研究所)

令和二年度共同利用研究成果発表会

2021年2月8日

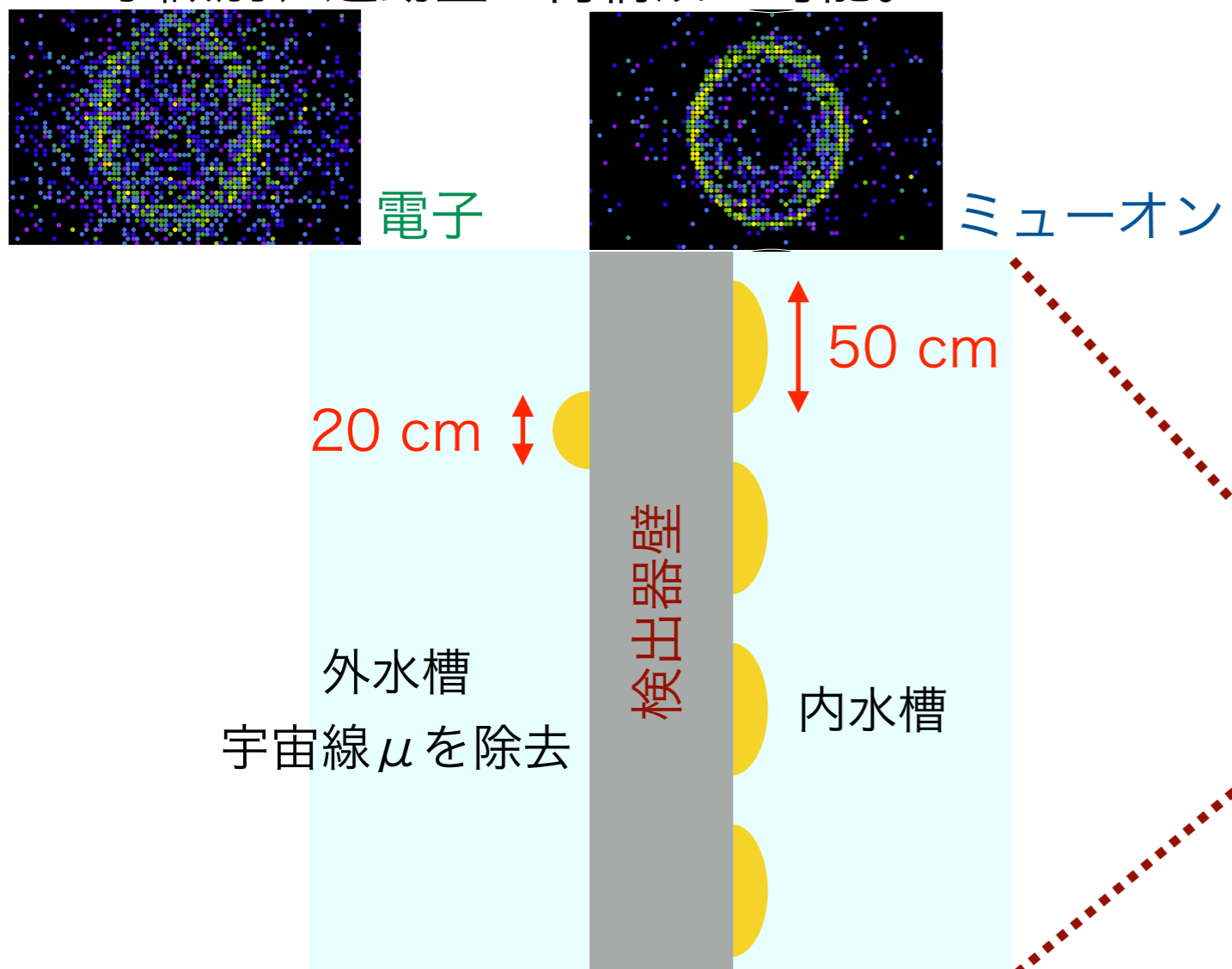
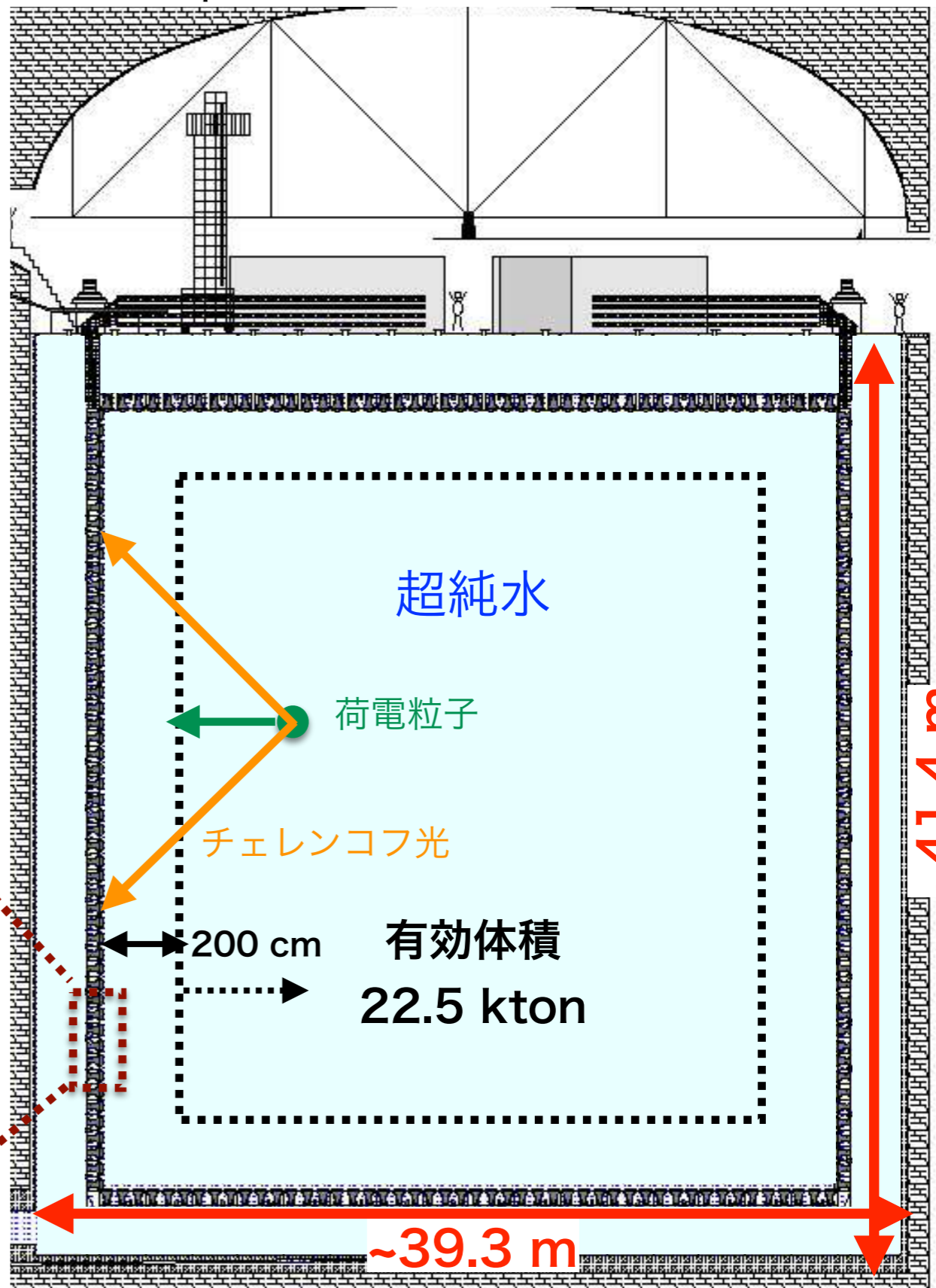
公表済みの結果リスト

- 公表済み論文 (<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/publications/index.html>)
 - Search for proton decay into three charged leptons in 0.37 megaton-years exposure of the Super-Kamiokande, Phys. Rev. D 101, 052011 (2020). 3つの荷電レプトンに崩壊する陽子崩壊探索
 - Indirect search for dark matter from the Galactic Center and halo with the Super-Kamiokande detector, Phys. Rev. D 102, 072002 (2020). 銀河中心での暗黒物質対消滅
由来のニュートリノ探索
 - Search for proton decay via $p \rightarrow e^+ \pi^0$ and $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$ with an enlarged fiducial volume in Super-Kamiokande I-IV, Phys. Rev. D 102, 112011 (2020). スーパーカミオカンデ拡張有効体積を使った
 $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 、 $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$ の探索 (今日のメイン)
 - Neutron-Antineutron oscillation search using a 0.37 megaton-years exposure of Super-Kamiokande, Phys. Rev. D 103, 012008 (2021). 中性子-反中性子振動探索
 - その他、スーパーカミオカンデでの大気ニュートリノイベント等に付随する中性子検出について論文準備中
- 国際会議等で報告済みの結果 (NEUTRINO2020)
 - 中性子情報を使った大気ニュートリノ振動解析
 - 重力波とニュートリノの同時計測探索
- 現在公表している結果は、純水運転時のデータを使用したものののみ。

スーパーカミオカンデ検出器(SK)

- 世界最大級の地下水チェレンコ検出器
- 荷電粒子からの水チェレンコフ光をPMTで捉え、その電荷と時間から事象を再構成。
- 検出器壁面に
 - 内水槽: 50 cm Φ PMT \times 11129本
 - 外水槽: 20 cm Φ PMT \times 1885本
- 壁面に投影されるチェレンコフリングから粒子識別、運動量の再構成が可能。

Super-Kamiokande sideview



有効体積拡張

SKの物理感度は現状統計量により制限。

→標準解析ツール改良で有効体積を拡張。

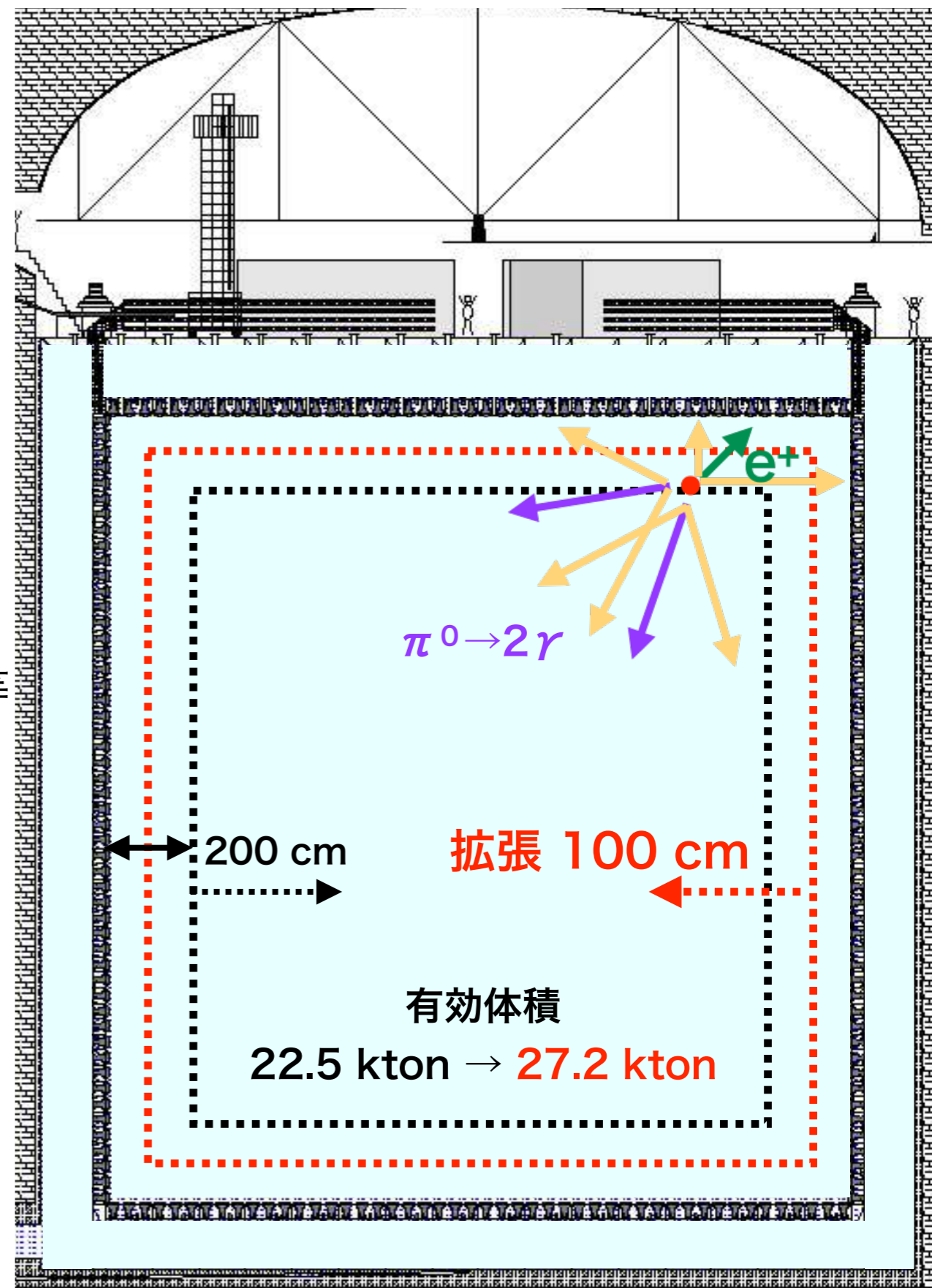
	既存の解析	拡張後
有効体積	22.5 kton	27.2 kton
陽子数	7.5×10^{33}	9.1×10^{33}
壁面からの距離	200 cm	100 cm
観測統計量 (1996~2018年)	372 kton*years	450 kton*years

利点

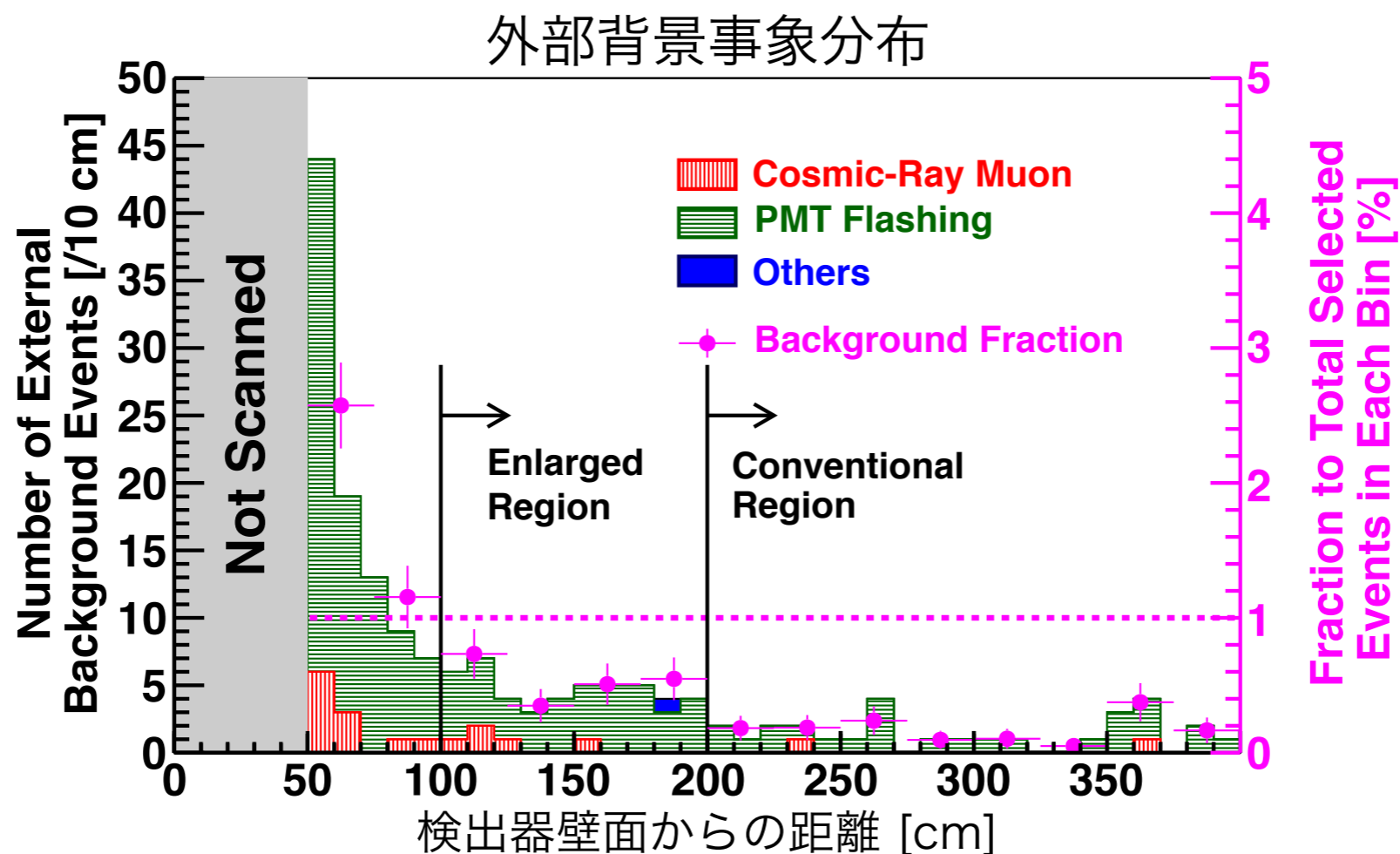
- 過去未使用だったデータ (78 kton*years, ~約3.5年分に相当) が利用可能となる。
- 核子崩壊探索、大気ニュートリノ振動解析等に使うSK高エネルギー (~GeV) データを用いた解析全体の精度向上が見込める。

有効体積拡張に向けた取り組み。

1. 検出器外部からの背景事象の見積もり。
2. 事象再構成の改良。
3. 検出器シミュレーション(MC)の妥当性を検証。
系統誤差評価。

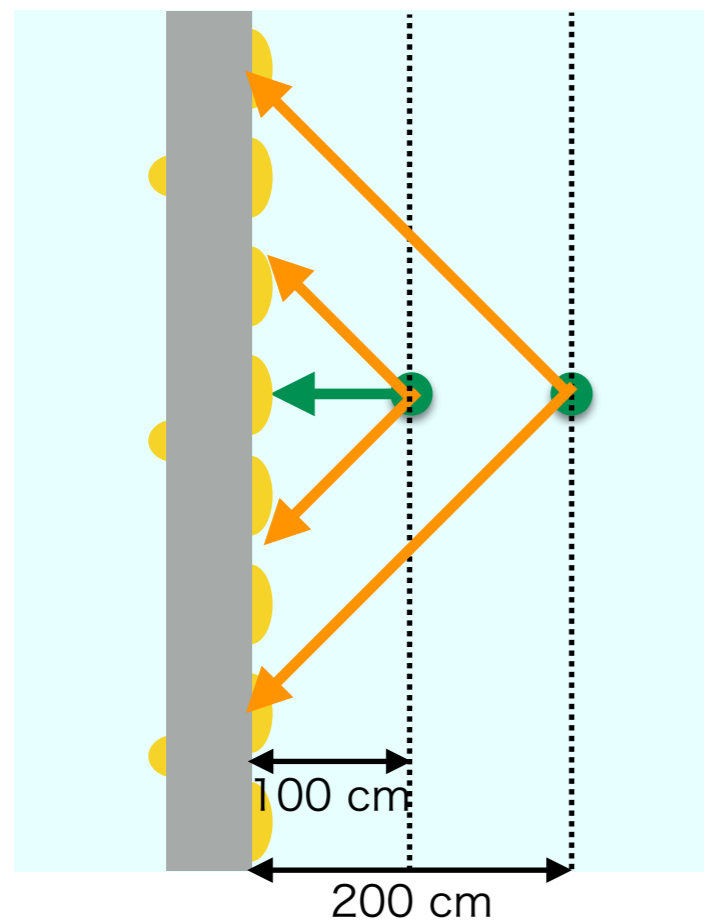


外部背景事象の見積もり



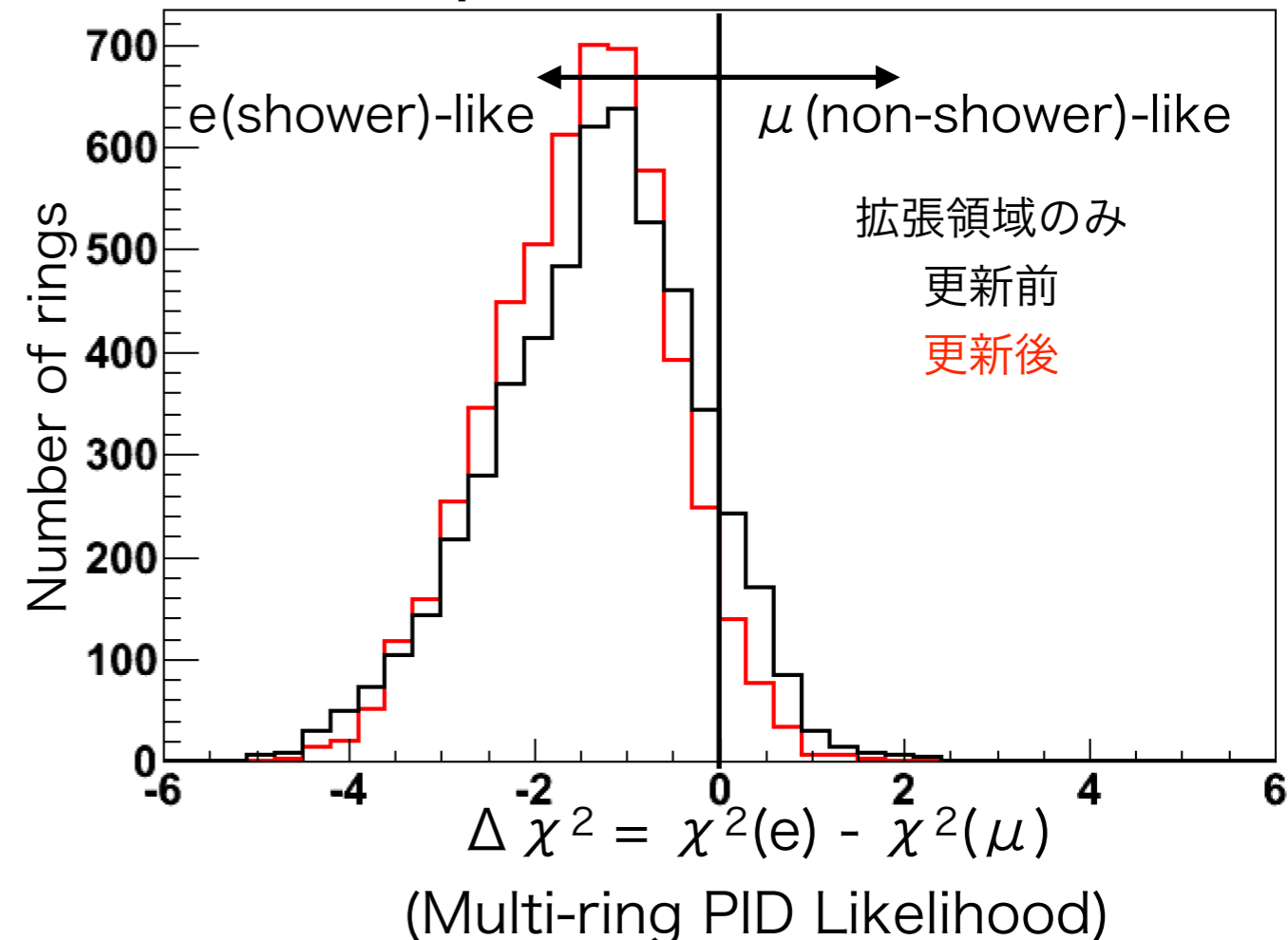
- SKの高エネルギー領域(\sim GeV)の物理解析データに入り込む、大気 ν や陽子崩壊以外の外部背景事象(宇宙線 μ 、PMT内部放電)の数を見積もった。
- 検出器壁面からの距離が50 cmの範囲までの全事象をeye-scanし、事象を分類。
- 壁面に近づくとつれ、背景事象の増加を確認。物理解析データを占める背景事象の割合が1%以下に抑えられる壁からの距離100 cmを新たな有効体積境界に定めた。

事象再構成(粒子識別)の改良



チェレンコフ光
荷電粒子

Free $p \rightarrow e^+ \pi^0$ ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$) MC



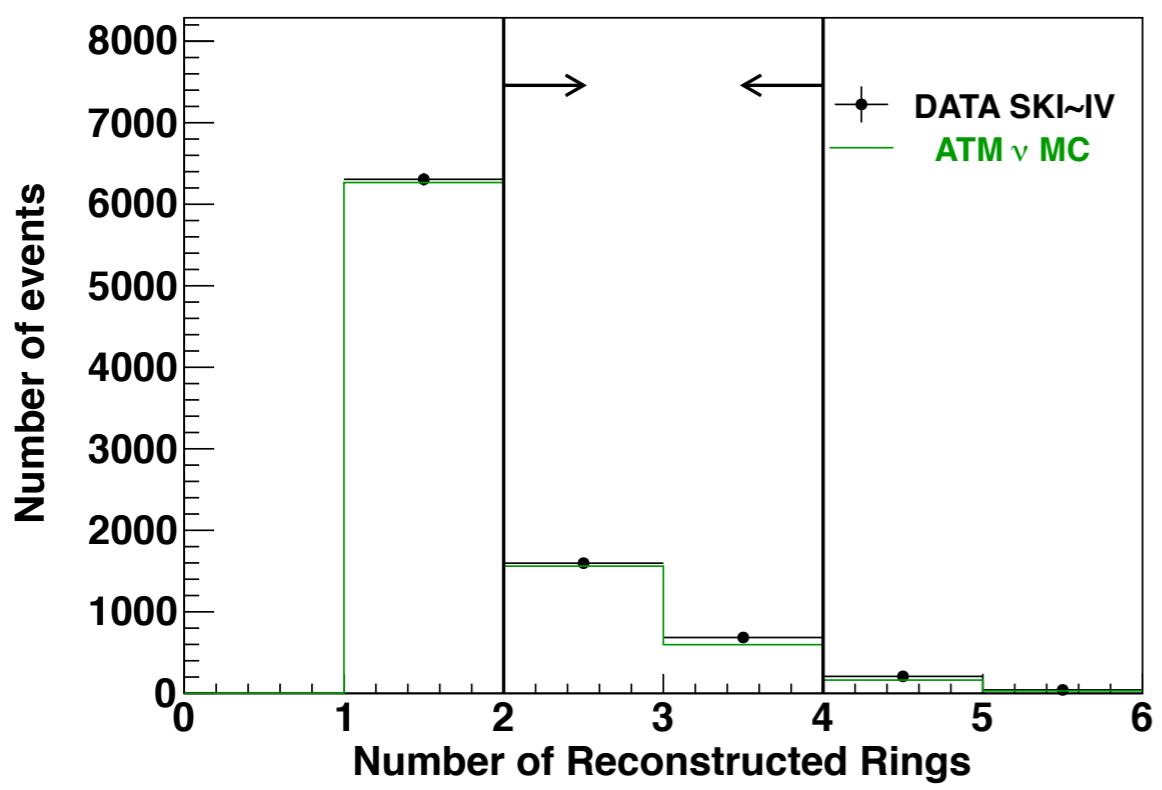
- 壁際の領域での事象再構成の難点: チェレンコフ光を検出するPMT数減少による粒子識別能力の悪化。
- 粒子識別判定は各粒子仮説での期待電荷(q_i^{exp})と観測電荷(q_i^{obs})を比較して行われる。

$$\chi^2(e \text{ or } \mu) \propto \sum_{i \text{ (Hit PMT)}} \log_{10}(\text{Prob}(q_i^{obs}, q_i^{exp}(e \text{ or } \mu)))$$
- この状況では、1本1本のPMTの期待電荷(q_i^{exp})をより正確に計算することが重要。→壁際の事象も含めて、より実際のチェレンコフ光分布を再現するように期待電荷分布を更新。
- 結果、拡張領域での陽子崩壊($p \rightarrow e^+ \pi^0$ 、 $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$)事象の信号検出効率を20%向上。1-ringの事象の粒子種誤識別率も~35%低減。

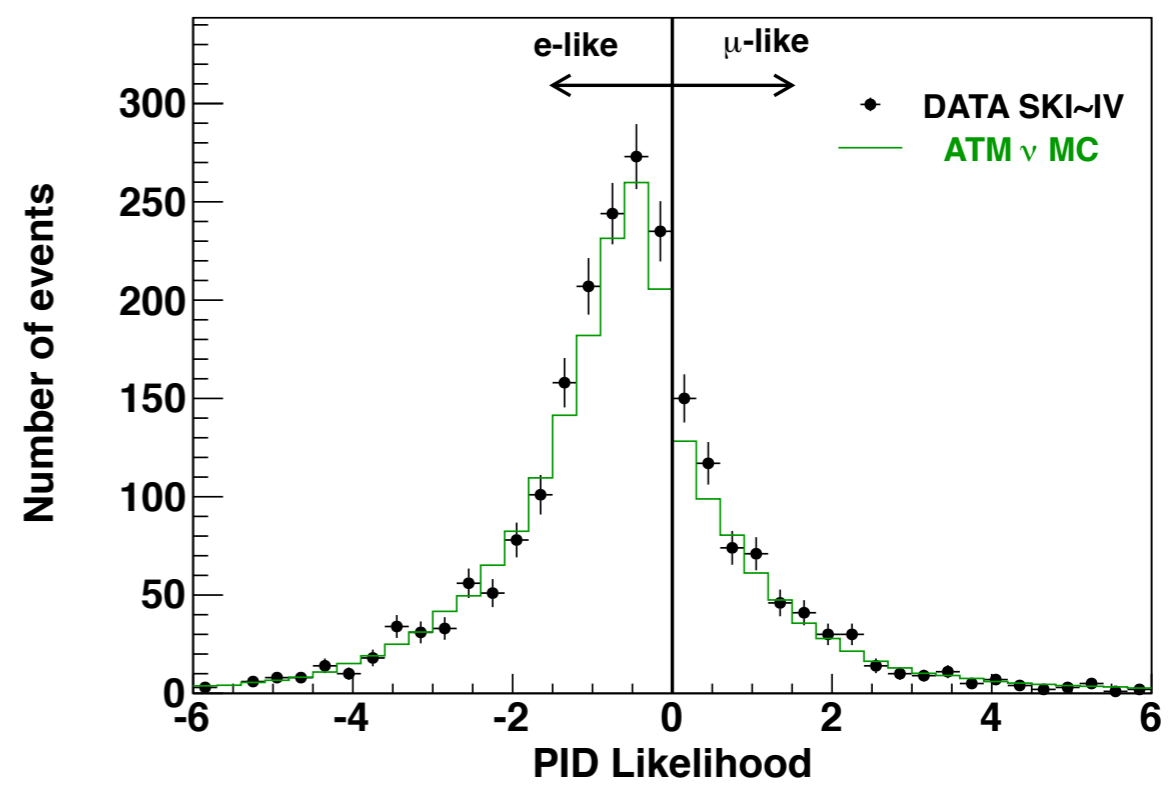
系統誤差評価

拡張領域における大気 ν 事象のData/MC比較。

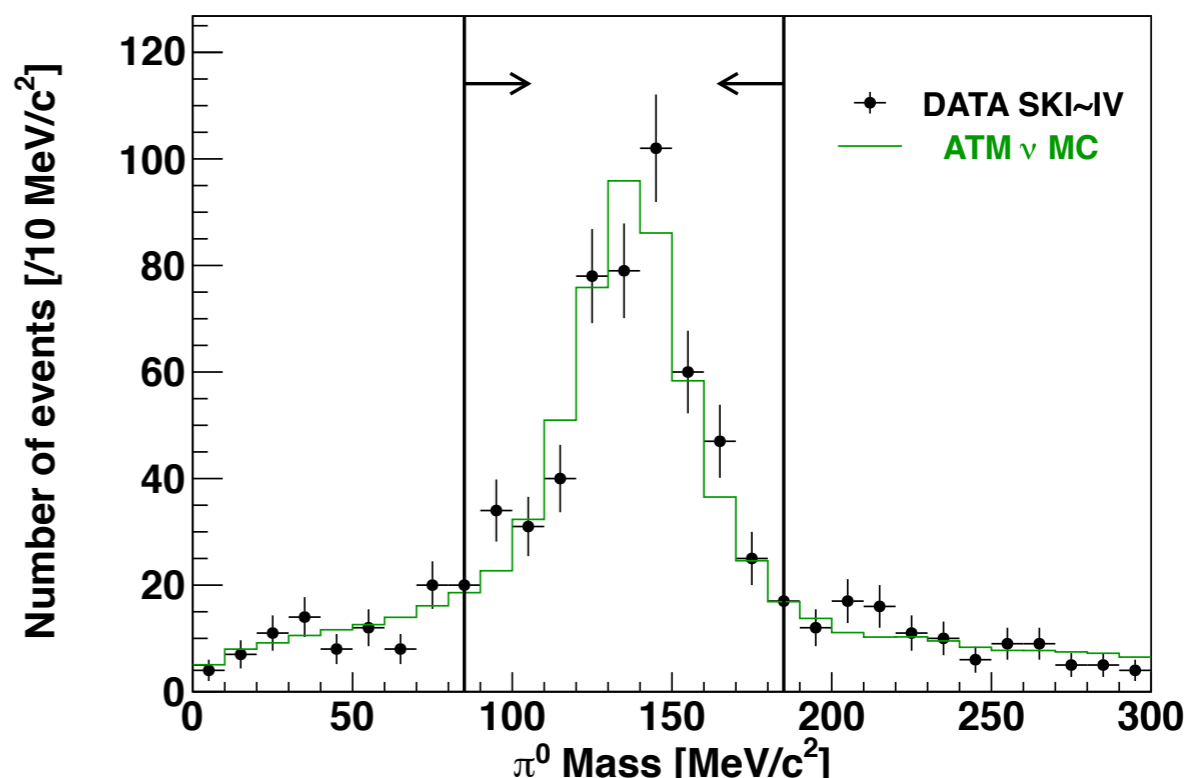
Number of Reconstructed Rings (SKI~IV 200 \geq dwall>100 cm)



1st ring PID Likelihood Distribution (SKI~IV 200 \geq dwall>100 cm)



π^0 Mass Distribution (SKI~IV 200 \geq dwall>100 cm)



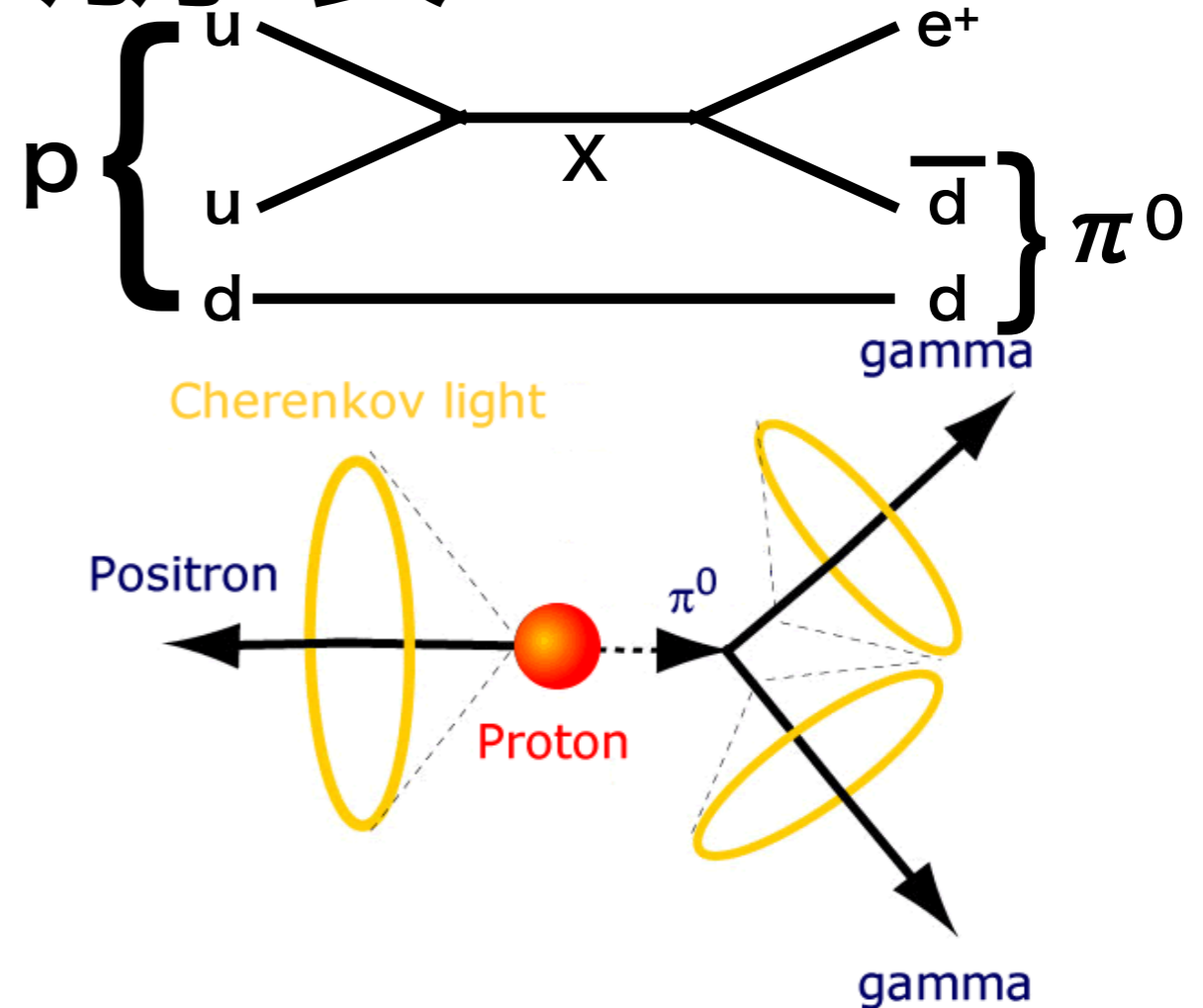
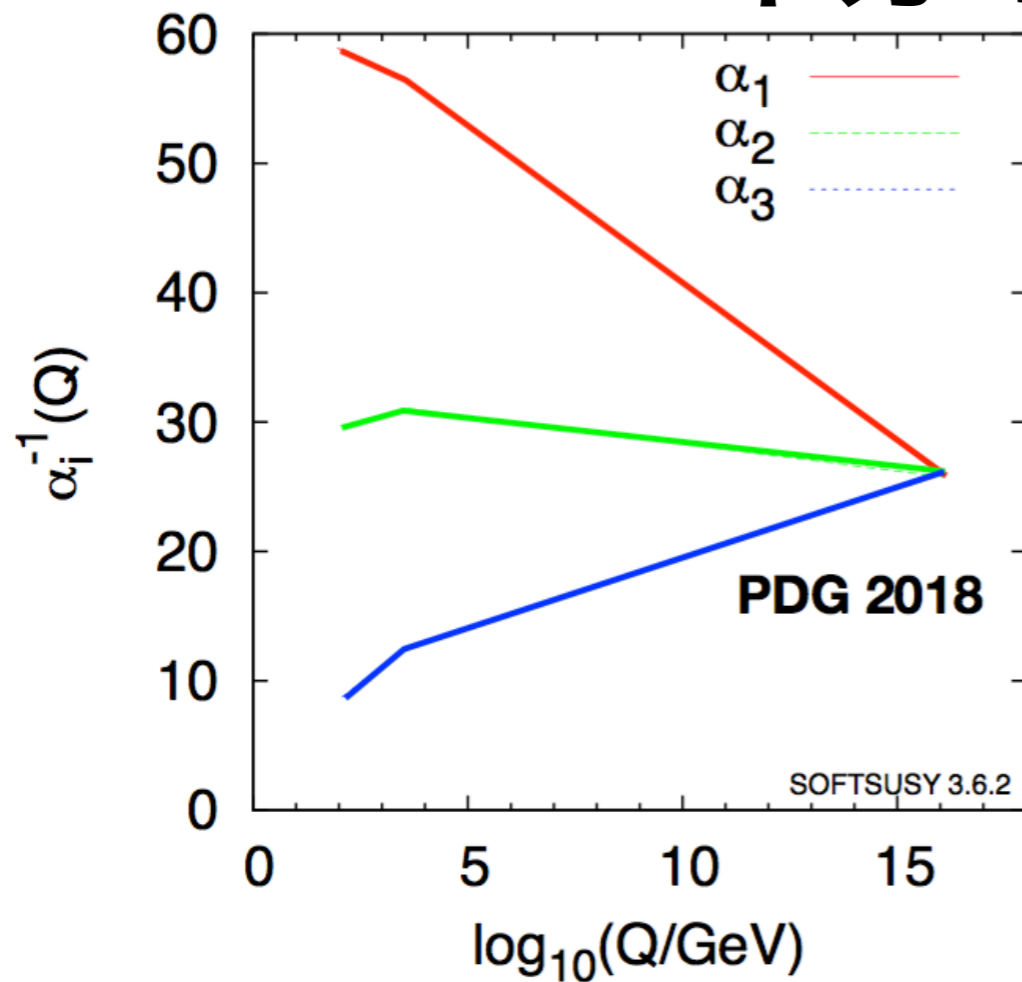
- 大気 ν 、宇宙線 μ データを用いて検出器応答由来の系統誤差を見積もり。

- 核子崩壊探索・大気ニュートリノ解析に最も重要なエネルギースケールの誤差は、既存の領域と同程度(~3%)に抑えられていることを確認。

- その他の測定量にも顕著なバイアス無し。

拡張有効体積を使った陽子
崩壊 ($p \rightarrow e^+ \pi^0, p \rightarrow \mu^+ \pi^0$)
探索結果

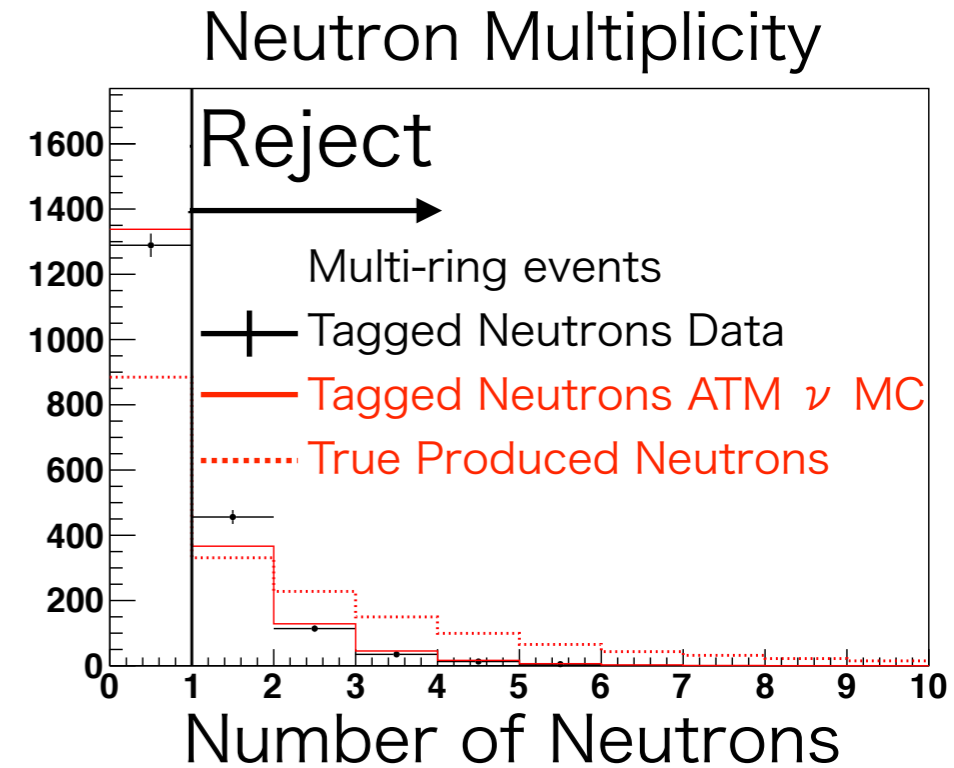
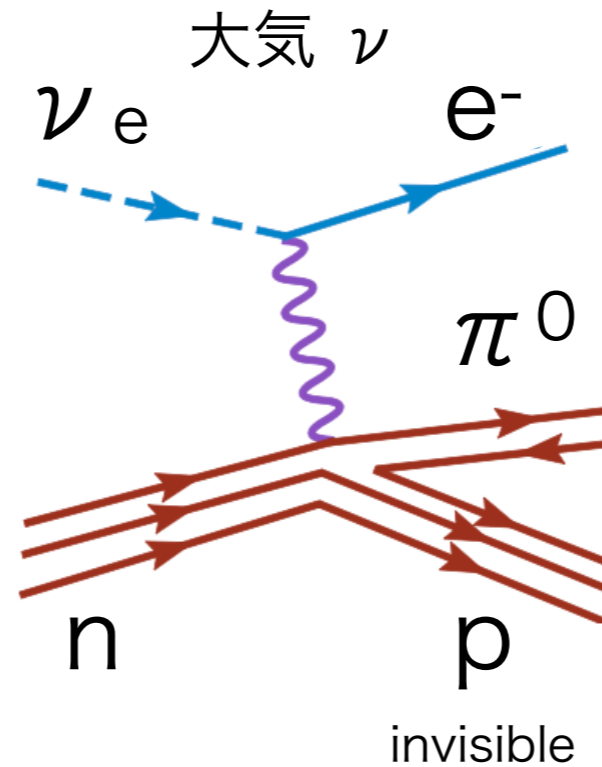
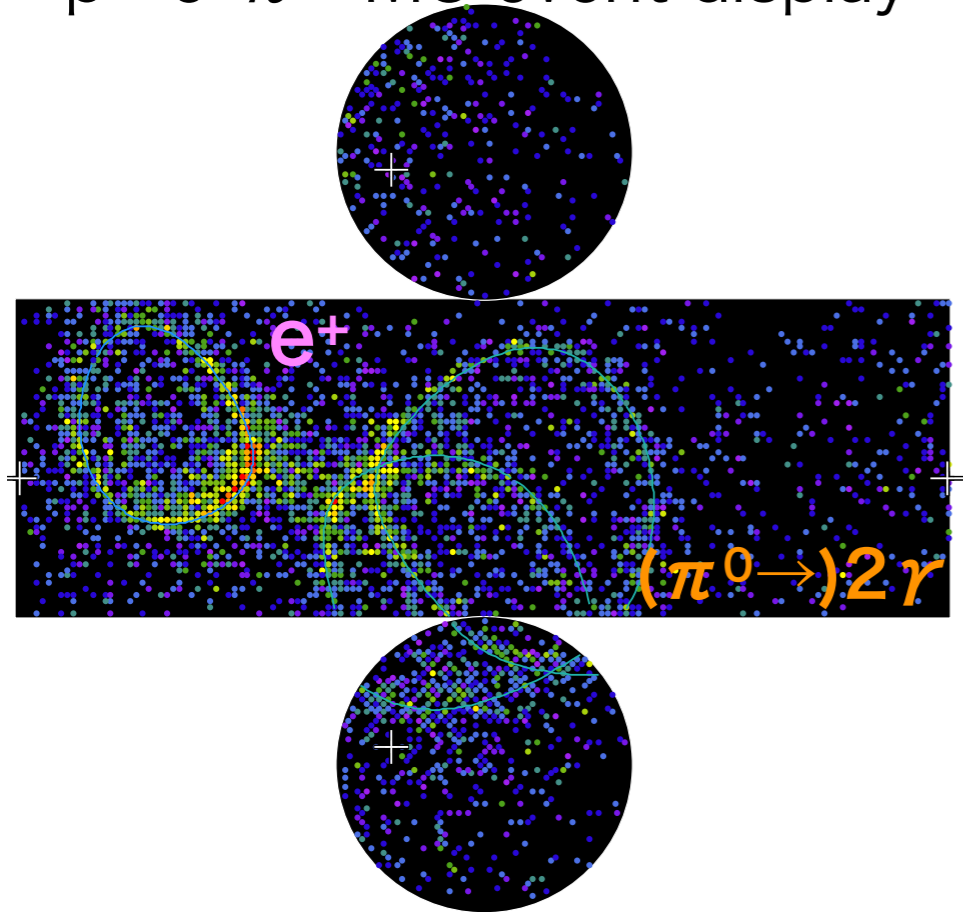
陽子崩壊



- 大統一理論(GUT): クォーク・レプトン間での電荷の量子化、 $\sim 10^{16}$ GeV付近での結合定数の統一を説明できる理論として提唱。
- GUTは、クォークからレプトンへの直接遷移となる陽子崩壊事象を予言。
- 予想される陽子の寿命 10^{30} 年以上。
- SKは、理論の予言範囲を世界最高感度で探索しているが、今までのところ、発見を示す信号の超過はない。

陽子崩壊信号と大気 ν 背景事象

$p \rightarrow e^+ \pi^0$ MC event display

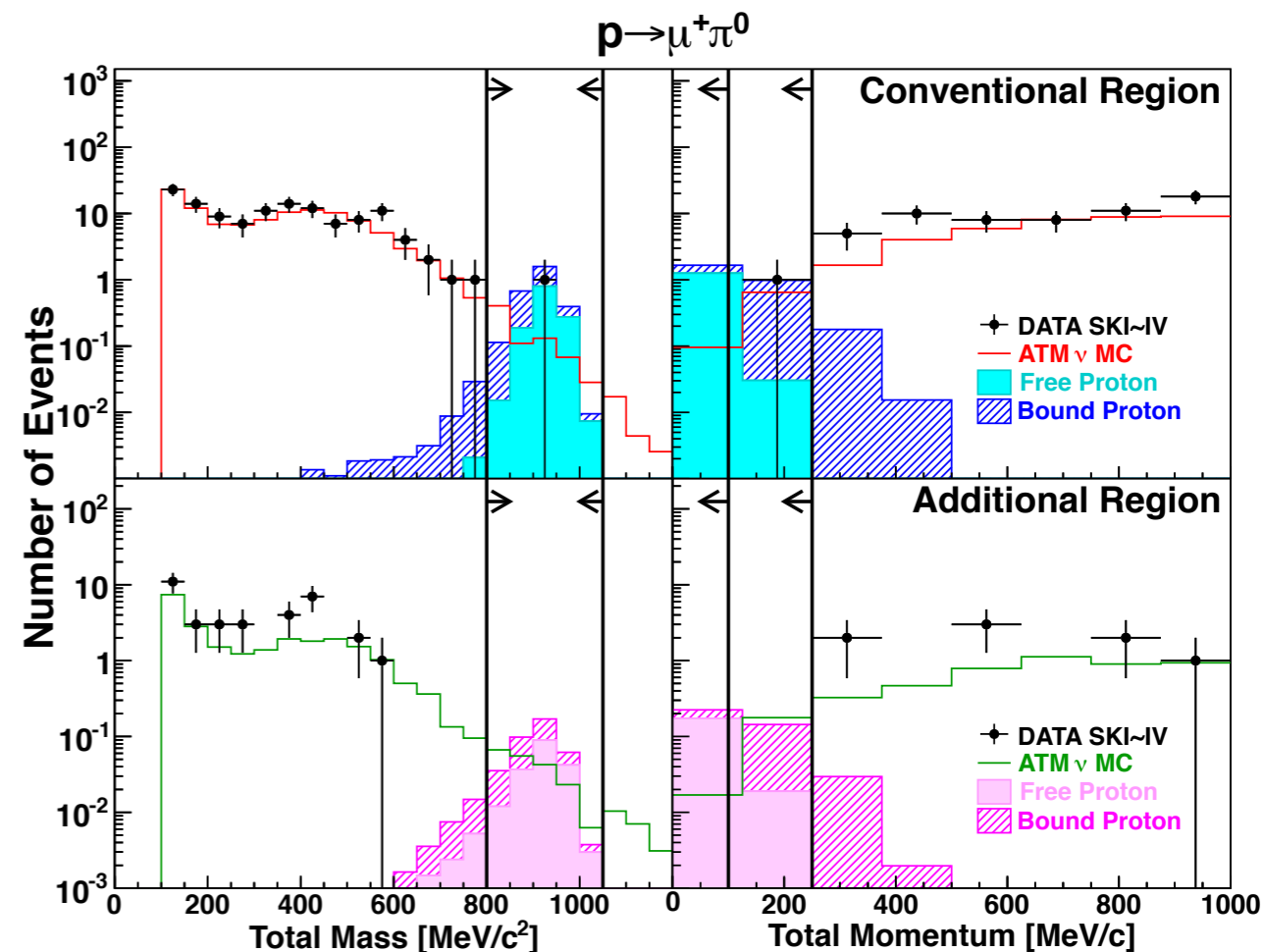
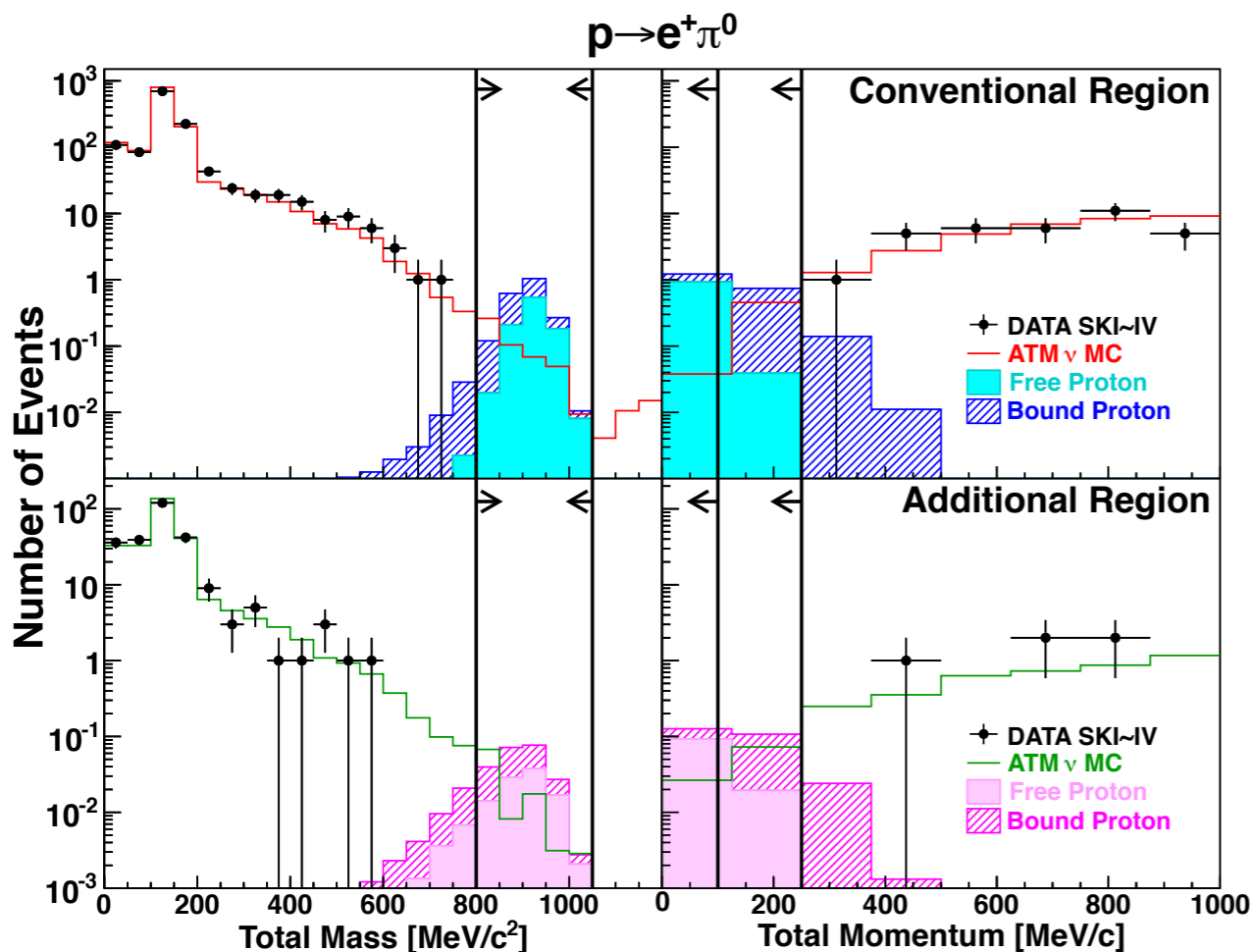


- π^0 からの 2γ を含めて全ての粒子が観測可能。
- 粒子がback-to-backに出る稀有な topology.
- 特に自由陽子(水素原子)崩壊は核内効果を受けず、クリーンな信号が期待できる。

- 大気 ν 事象が陽子崩壊の背景事象になりうる。
- 2008年から電子回路・トリガーシステムの刷新により、全てのPMT hitが記録可能となり中性子(捕獲由来の γ)信号を検出。
 - $n+p \rightarrow d + \gamma$ (2.2 MeV)
 - 中性子検出効率は約25%.
- **大気 ν 事象に伴う中性子を検出することで大気 ν 背景事象数約半減を達成。** 中性子条件による検出効率の損失は<4%。

$p \rightarrow e^+ \pi^0, p \rightarrow \mu^+ \pi^0$ 探索結果

SK-I to -IV全データ: 1996~2018年, 450 kton*years.



	有効体積	既存の解析領域	拡張領域
		22.5 kton	4.7 kton
信号検出効率	BOX1	19.5+/-1.7%	10.3+/-1.4%
	BOX2	20.3+/-3.3%	15.5+/-2.6%
	TOTAL	39.8%+/-3.7%	25.8+/-3.0%
期待背景事象数 (lifetimeで規格化)	BOX1	0.01+/-0.01 ev	0.01+/-0.01 ev
	BOX2	0.48+/-0.21 ev	0.09+/-0.05 ev
	TOTAL	0.49+/-0.21 ev	0.10+/-0.05 ev

候補事象 0

$\tau / B(p \rightarrow e^+ \pi^0) > 2.4 \times 10^{34}$ years

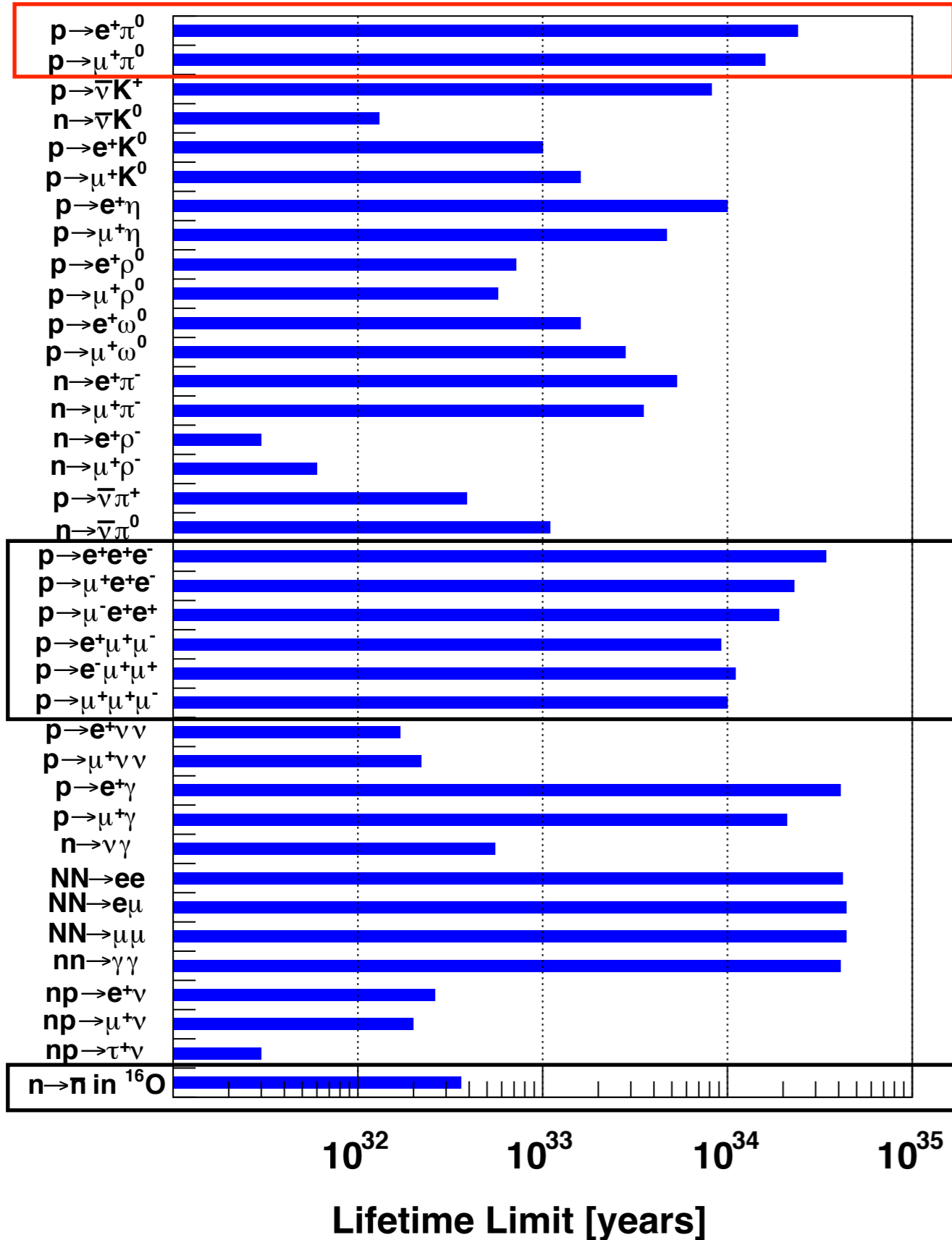
	有効体積	既存の解析領域	拡張領域
		22.5 kton	4.7 kton
信号検出効率	BOX1	18.5+/-1.7%	11.7+/-1.2%
	BOX2	17.8+/-3.3%	13.5+/-2.4%
	TOTAL	36.3%+/-3.7%	25.2+/-2.7%
期待背景事象数 (lifetimeで規格化)	BOX1	0.04+/-0.03 ev	0.01+/-0.01 ev
	BOX2	0.70+/-0.24 ev	0.19+/-0.08 ev
	TOTAL	0.74+/-0.24 ev	0.19+/-0.08 ev

候補事象 1

$\tau / B(p \rightarrow \mu^+ \pi^0) > 1.6 \times 10^{34}$ years

拡張領域を含め、信号超過は見られず。これらのモードに対して世界で最も厳しい制限。

SKでのバリオン数を破る過程の探索結果



拡張有効体積を使った $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 、 $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$ の探索
[Phys. Rev. D 102, 112011 \(2020\)](#)

※ $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 、 $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$ 以外は
 既存の有効体積での探索結果。
 今後他のモードも拡張有効体積
 で探索していく。

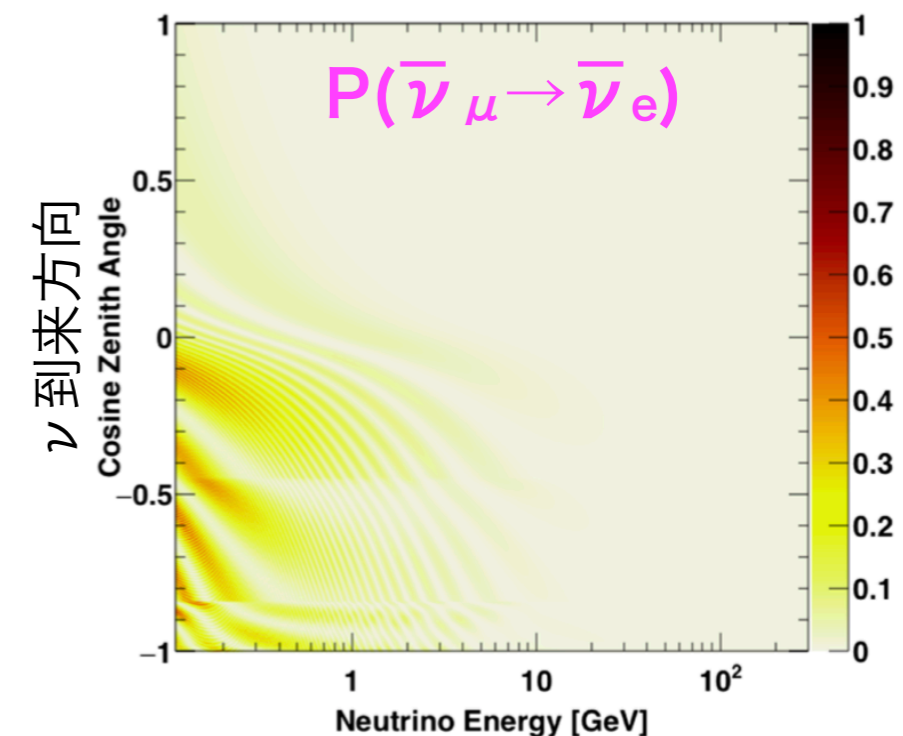
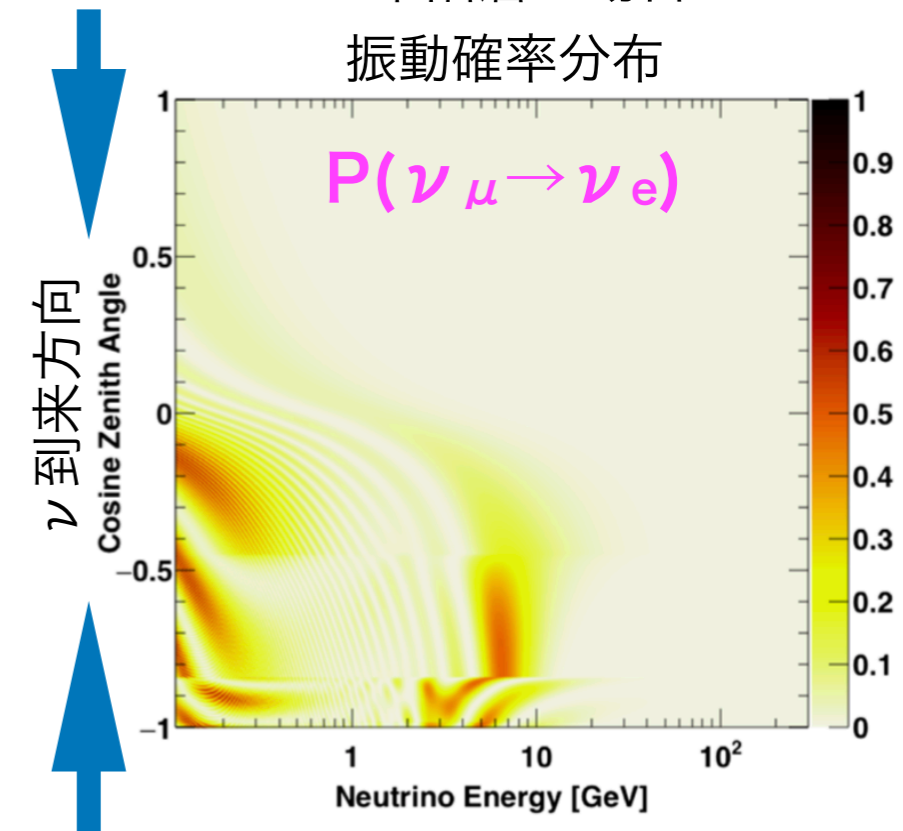
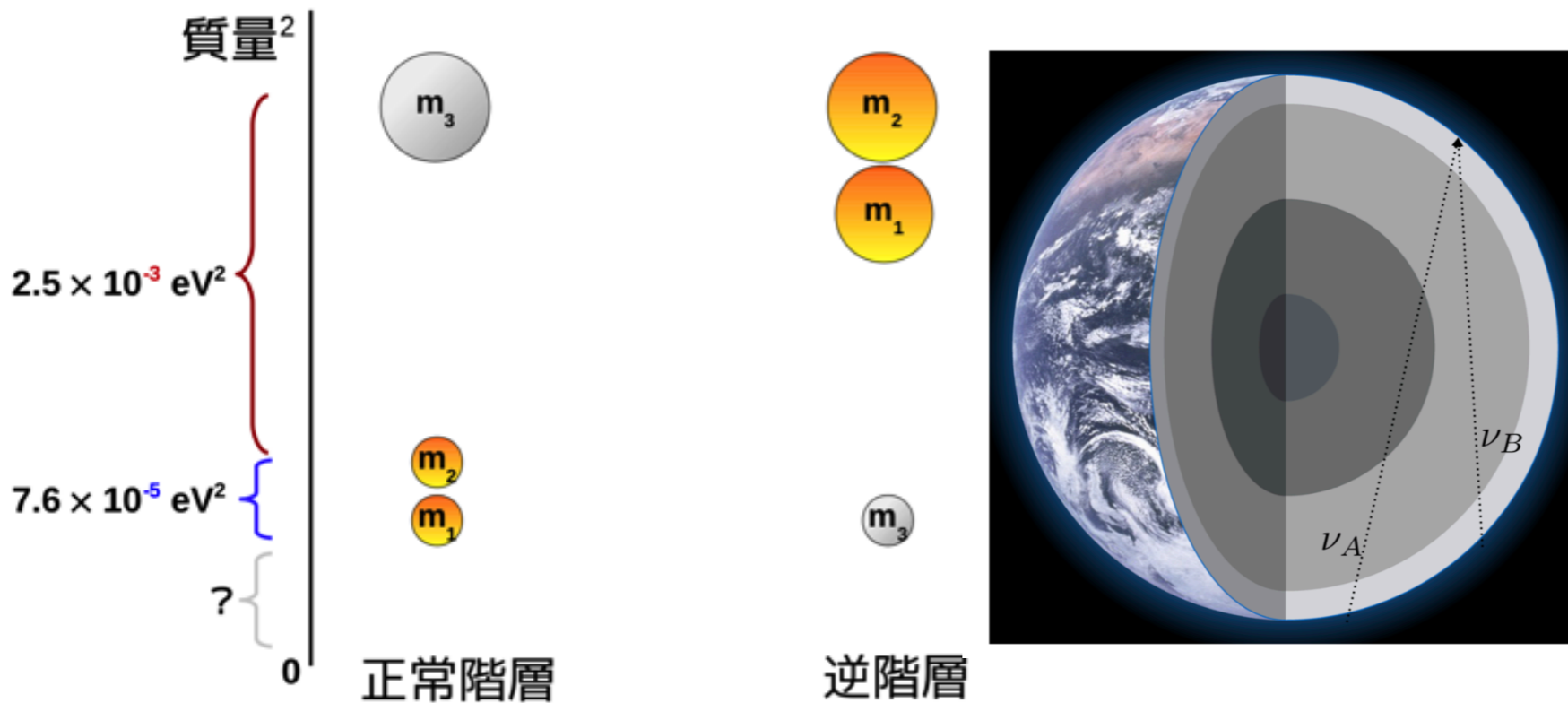
3つの荷電レプトンに崩壊する陽子崩壊探索
[Phys. Rev. D 101, 052011 \(2020\)](#)

中性子-反中性子振動探索
[Phys. Rev. D 103, 012008 \(2021\)](#)

大気ニュートリノノ振動解析

大気ニュートリノの振動解析

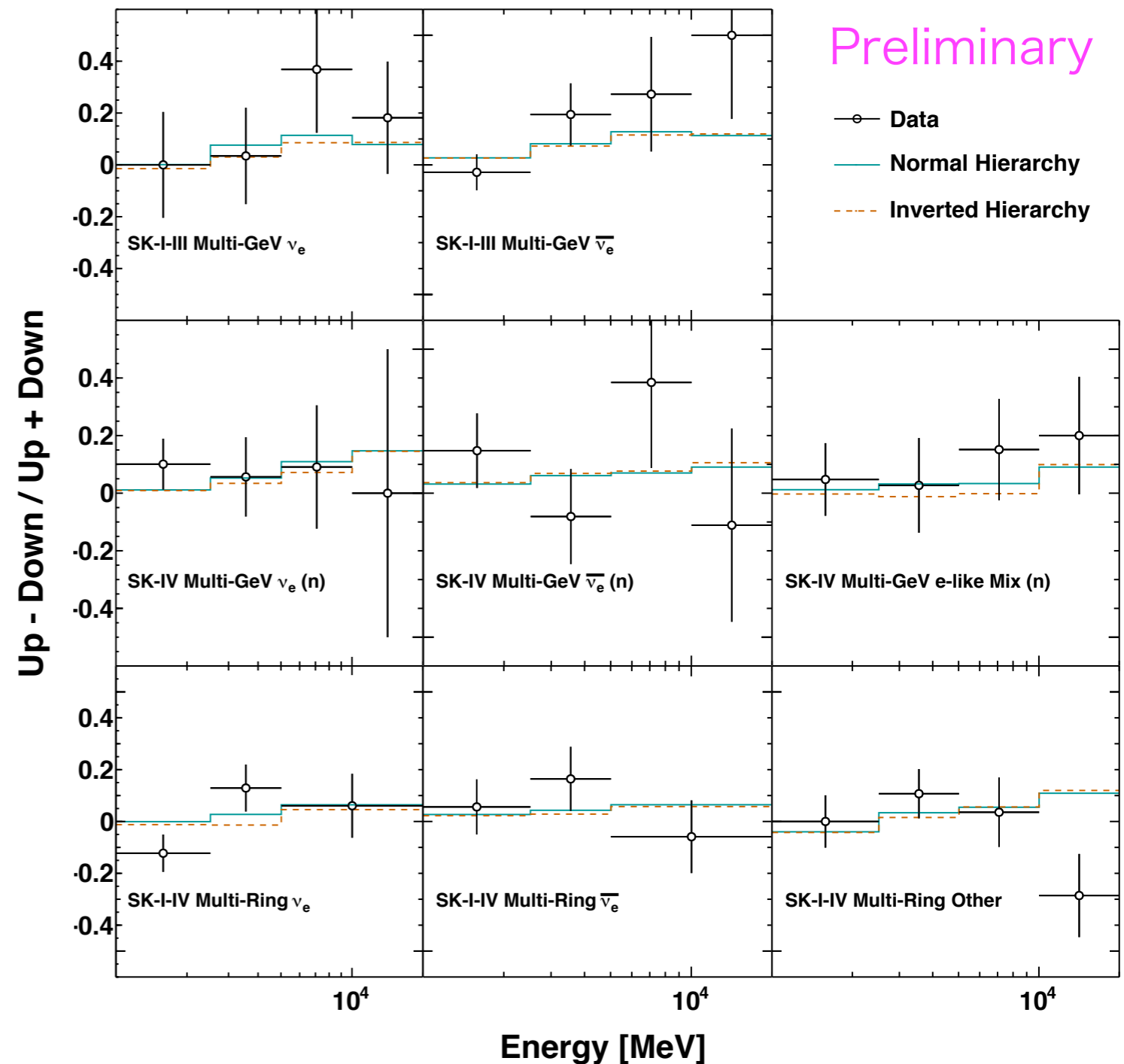
正常階層の場合
振動確率分布



- 大気ニュートリノデータを使ったニュートリノ振動現象の全貌解明。
- 特に、ニュートリノ質量階層性の決定に高い感度。
- 物質効果により質量階層性に応じて、Multi-GeV領域での $\nu_e/\bar{\nu}_e$ 出現確率が変化する。

解析の改善

- SK-IV(2008~2018年)データの1-ring事象について、中性子情報を使ったサンプル分けを導入
 - 中性子無し→ ν -like
 - 中性子有り→ $\bar{\nu}$ -like
- 複数-ring事象について、サンプル分けに用いる多変数解析手法をlikelihoodからBDTに変更。
 - サンプル分けの効率、純度が向上。

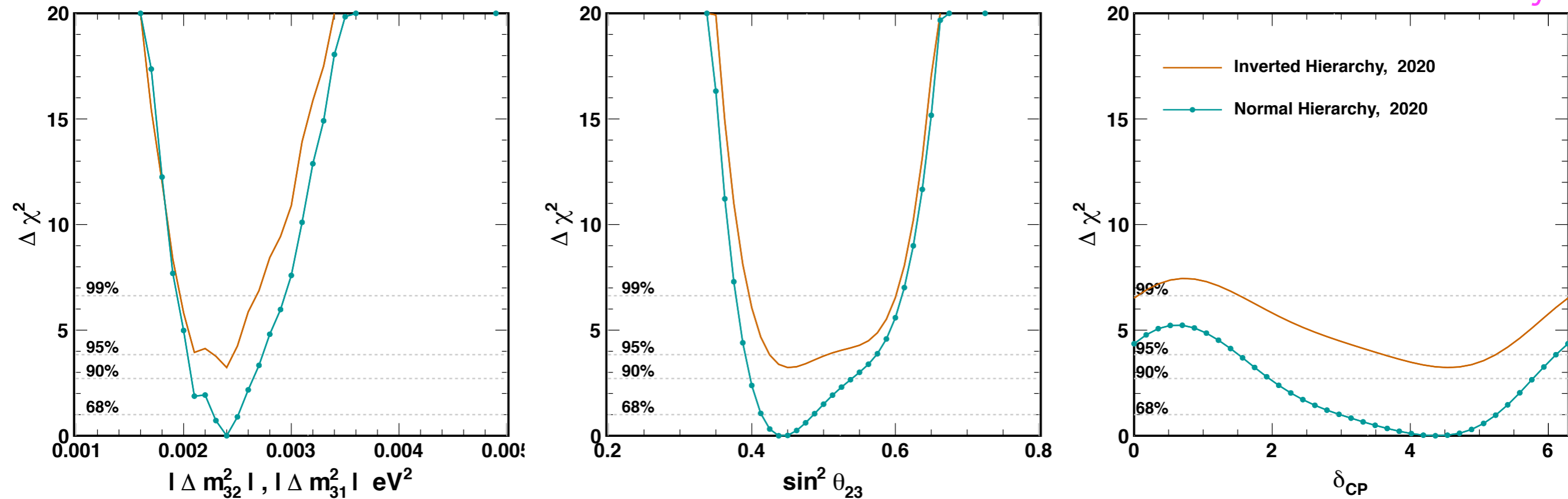


振動解析の最新結果

SK-I to -IV全データ: 1996~2018年。

22.5 kton有効体積の結果。

Preliminary



930 Bins	χ^2	θ_{13}	δ_{CP}	θ_{23}	Δm_{23} (x10 ⁻³)
SK (NH)	1037.5	0.0218	4.36	0.44	2.4
SK (IH)	1040.7	0.0218	4.54	0.45	2.4

- 正常階層を支持: $\chi^2(\text{正常階層}) - \chi^2(\text{逆階層}) = -3.2$
- $\delta_{CP} \sim 3/2\pi$
- 大気ニュートリノ解析でも拡張有効体積を今後利用する。

まとめと今後

- SK検出器の有効体積拡張を可能にした。
 - 有効体積22.5 kton → 27.2 kton
 - 核子崩壊各種モード探索、大気 ν 振動解析への応用。
- 拡張有効体積で陽子崩壊事象($p \rightarrow e^+ \pi^0$ 、 $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$)を探索したが、有意な信号の超過は見つからず。。。
 - $\tau / B(p \rightarrow e^+ \pi^0) > 2.4 \times 10^{34}$ years (90% C.L.) (候補事象無し)
 - $\tau / B(p \rightarrow \mu^+ \pi^0) > 1.6 \times 10^{34}$ years (90% C.L.) (1候補事象)
- Gd導入により向上した中性子検出性能を用い、大気ニュートリノ背景事象をさらに低減し、よりクリーンな探索が行われる見込み。

中性子検出効率

大気 ν 削減効率

~25%
(H capture)

~50%
(Gd 0.01%)

~90%
(Gd 0.1%)

~50%

~65%

~80%

- 中性子情報導入を含めた解析改善が大気ニュートリノ解析で行われた。
 - 正順階層を支持: $\chi^2(\text{正常階層}) - \chi^2(\text{逆階層}) = -3.2$, $\delta_{CP} \sim 3/2\pi$**
- 有効体積拡張による統計量向上・高い中性子検出効率でサンプル分けをさらに効率化等の改善で質量階層性の決定を目指す。