

スーパーカミオカンデにおける最新結果 (大気ニュートリノ、核子崩壊探索、等)

亀田純

(東京大学宇宙線研究所)

H28年度 東京大学宇宙線研究所
共同利用成果発表会

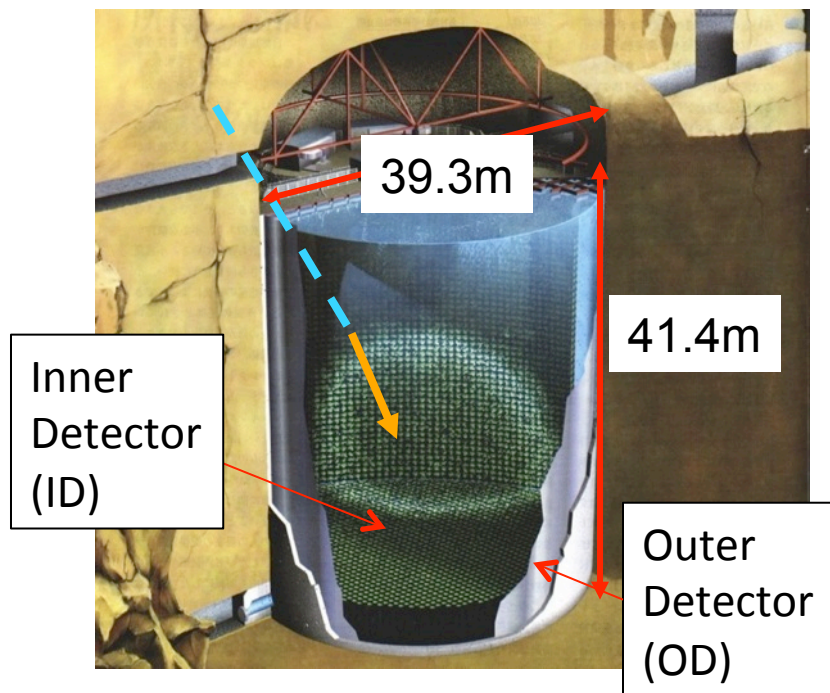
2016.12.09

H.28 共同利用研究課題

- A01 三浦 真 (宇宙線研) 大気ニュートリノのシミュレーション計算の研究
- A02 塩澤 真人 (宇宙線研) 大気ニュートリノフラックスとニュートリノ振動研究
- A03 奥村 公宏 (宇宙線研) 大気ニュートリノにおける3世代振動事象の研究
- A04 亀田 純 (宇宙線研) 大気およびビームニュートリノのフレーバー(e型、 μ 型)同定の研究
- A05 中畑 雅行 (宇宙線研) 太陽ニュートリノエネルギースペクトルの研究
- A06 池田 一得 (宇宙線研) SKにおける太陽ニュートリノ観測
- A07 福田 善之 (宮城教育大学) 太陽ニュートリノにおける昼夜効果の精密観測
- A08 石野 宏和 (岡山大学) 超新星爆発モニターの研究
- A09 小汐 由介 (岡山大学) 超新星背景ニュートリノの研究
- A10 塩澤 真人 (宇宙線研) $e+\pi^0$ 陽子崩壊モードの研究
- A11 三浦 真 (宇宙線研) 陽子崩壊 $p \rightarrow \nu K^+$ の研究
- A12 伊藤 好孝 (名古屋大学) 上向きミューオンと高エネルギーニュートリノの研究
- A15 早戸 良成 (宇宙線研) 加速器データを用いた ν 相互作用シミュレーションの研究
- A16 中山 祥英 (宇宙線研) T2K実験における νe 出現測定のための研究
- A18 森山 茂 栄(宇宙線研) スーパーカミオカンデのエネルギーキャリブレーション

共同利用研究 計80万円

スーパーカミオカンデ



- Up/Down Symmetric response
- Cylindrically symmetric response
- Good energy reconstruction ($\sim 3\%$ @ 1GeV)
- 4π acceptance, **very efficient π^0/e separation.**
- **High Particle ID (μ/e) power ($\sim 99\%$ at 600MeV/ c)**

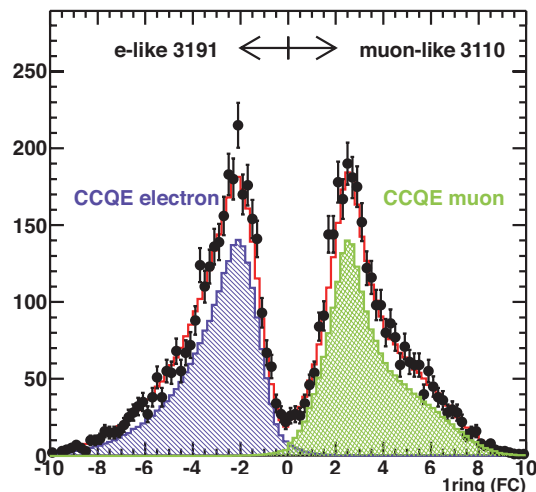
- Ring-imaging Water Cherenkov Detector, @1000m underground, Kamioka, Japan
- **Multi-Purpose experiment**
(Atm. ν , WIMP, Proton decay, solar- ν , T2K,..)
- 22.5kton Fiducial Volume.

4つの期間、20年の測定！

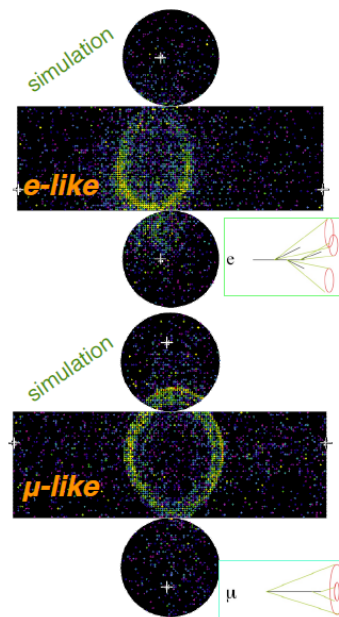
SK-I (1996-2001) SK-II (2003-2005)

SK-III(2005-2008) SK-IV(2008-Present) \rightarrow total **5326** livetime-days data

大気ニュートリノサンプル



Particle Identifier

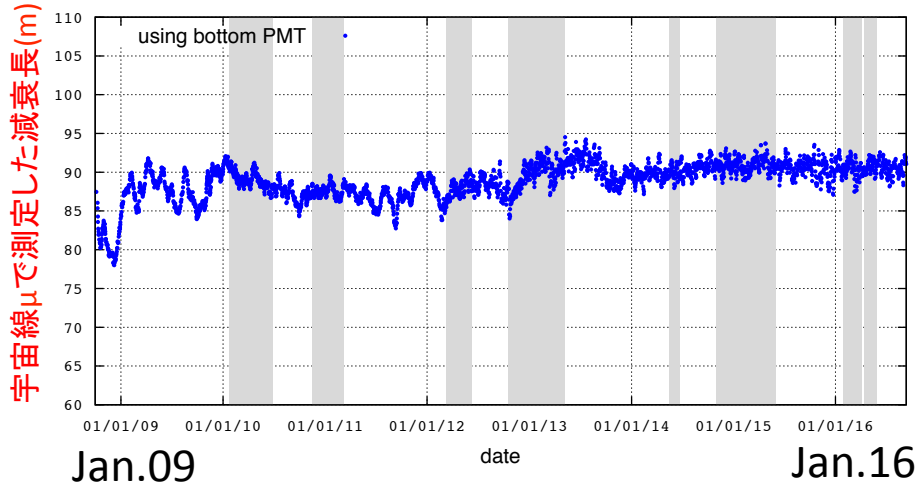


スーパーカミオカンデ観測20周年記念祝賀会



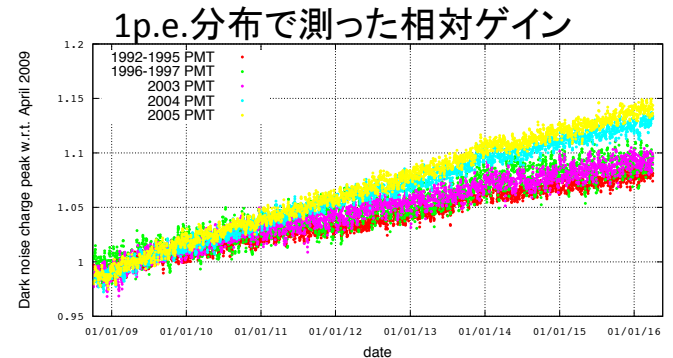
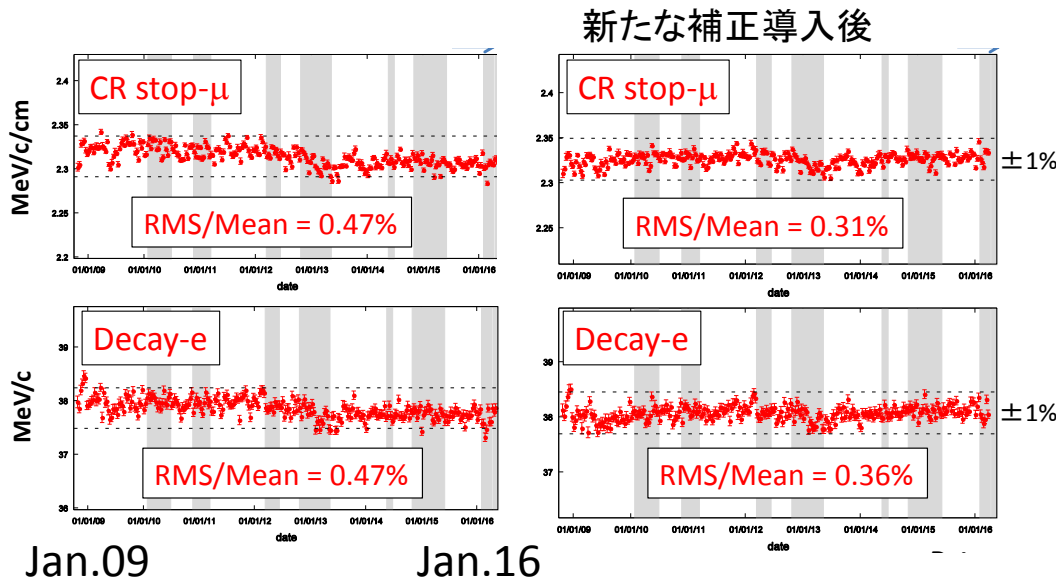
- スーパーカミオカンデの観測20周年を記念して、6月17日に祝賀会およびシンポジウムを開催。
- 多くの来賓、現旧コラボレーター、関係者を招いて盛大に行いました。
- ご参加、ご協力頂きました方々、ありがとうございました。

スーパーカミオカンデ稼働状況



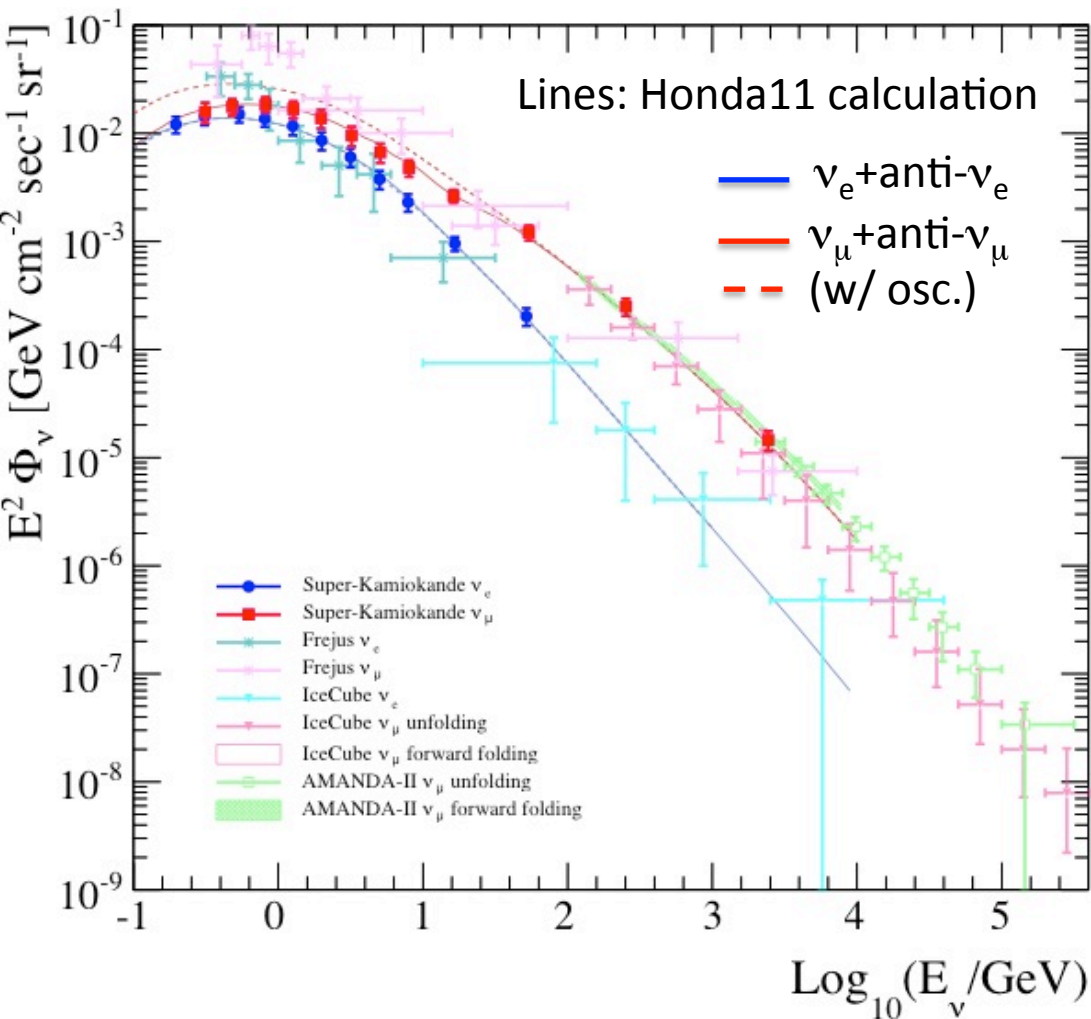
- 安定して稼働を行っている。
- この一年のダウンタイムはおよそ0.8%、その80%以上はcalibrationによる。
- 水質も安定してコントロール。

- PMTのゲインの時間変動などの理解を更に進めた。
- 再構成された運動量の時間変動をさらに小さくすることが出来た。



大気ニュートリノのフラックス測定

Phys. Rev. D 94, 052001 (2016), arXiv: 1510.08127



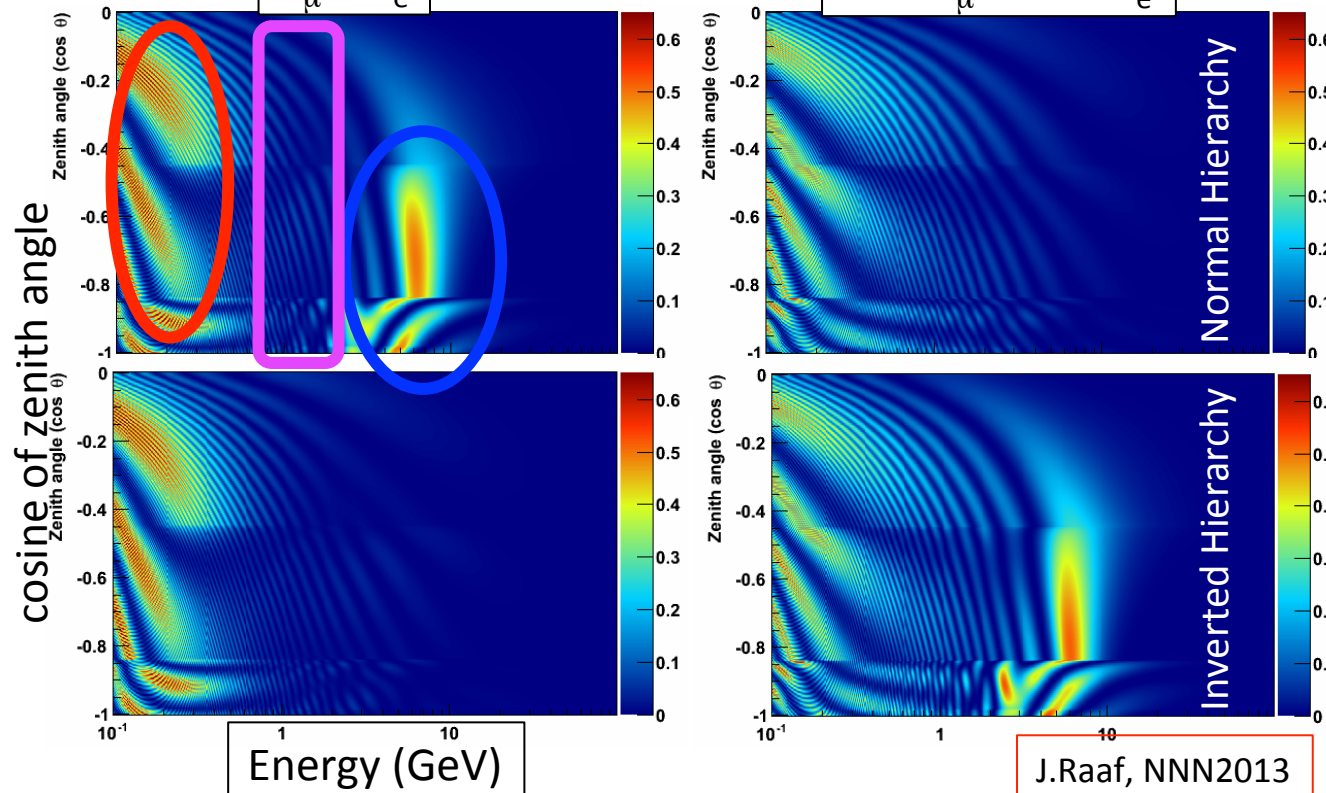
- 観測される大気ニュートリノ事象よりニュートリノフラックス($\nu_\mu + \text{anti-}\nu_\mu$, $\nu_e + \text{anti-}\nu_e$)を求めた。
- Bayesian unfolding method: No bias, mathematically robust.
- 検出器 systematic errors, neutrino interactions systematic errorを考慮。
- 低エネルギー領域(100GeV以下)にて精度の高い測定結果を得た

大気ニュートリノにおけるニュートリノ振動

(ϕ (osc.) / ϕ (no-osc.))

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

anti- $\nu_\mu \rightarrow$ anti- ν_e



- “Solar term” \rightarrow $\sin^2\theta_{23}$ octant
- Interference term \rightarrow CP violation phase
- Resonance term \rightarrow mass hierarchy

質量階層性に応じてResonanceが ν もしくは反 ν に起こる。

J.Raaf, NNN2013

$$\frac{\Psi(\nu_e)}{\Psi_0(\nu_e)} - 1 \cong P_2(r \cdot \cos^2 \theta_{23} - 1)$$

“Solar Term”

Interference

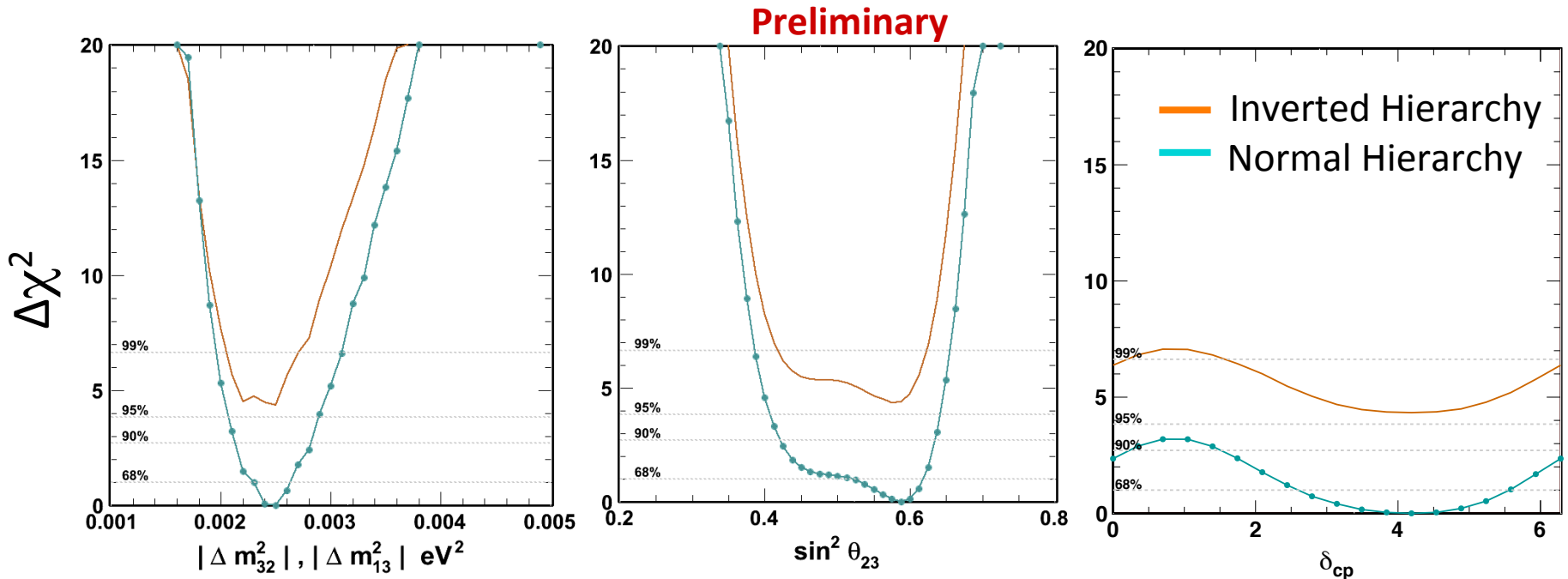
$$-r \cdot \sin^2 \tilde{\theta}_{13} \cdot \cos^2 \tilde{\theta}_{13} \cdot \sin 2\theta_{23} (\cos \delta_{CP} \cdot R_2 - \sin \delta_{CP} \cdot I_2)$$

$$+ 2 \sin^2 \tilde{\theta}_{13} (r \cdot \sin^2 \theta_{23} - 1)$$

Resonance

P2: Osc. prob. driven by 12 sector
 r: ν_μ/ν_e flux ratio
 R2, I2: osc. prob driven by 12sector

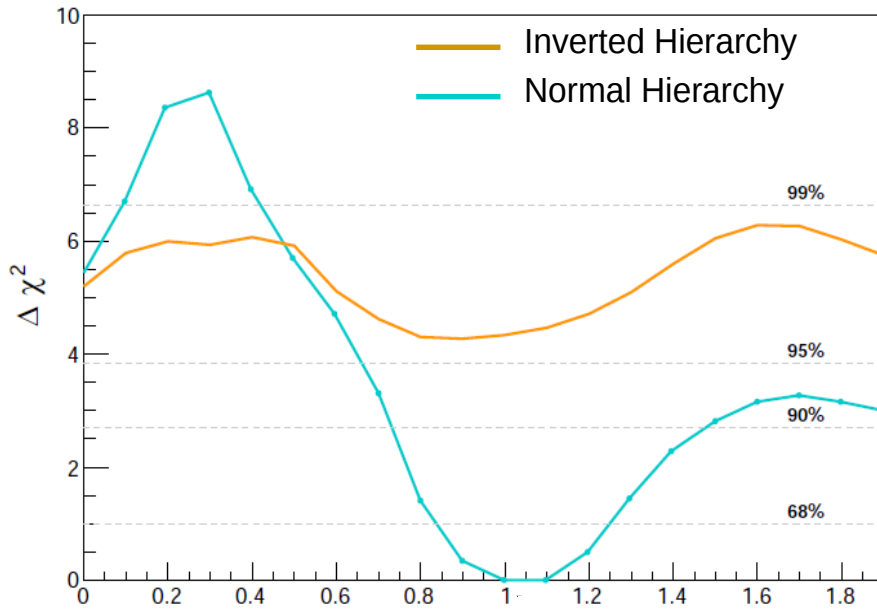
Three flavor ν oscillation analysis Super-K atm. ν



Fit (517 d.o.f.)	χ^2	δ_{cp}	θ_{23}	$\Delta m_{23} (\times 10^{-3})$
Normal Hierarchy	571.74	4.189	0.587	2.5
Inverted Hierarchy	576.08	4.19	0.575	2.5

- $\chi^2_{NH} - \chi^2_{IH} = -4.3$ (**-3.1 expected**)
- $\Delta\chi^2$ が -4.3以下となる確率は IHが真の場合 0.03 ($\sin^2\theta_{23}=0.6$), 0.007 ($\sin^2\theta_{23}=0.4$). NHが真の場合 : 0.45 ($\sin^2\theta_{23}=0.6$)
- θ_{13} はPDGのaveraged valueに固定。不定性は系統誤差として考慮。

物質効果



- スーパーカミオカンデのデータは物質効果の存在をfavorするか？
- 現象論的にスケールファクター α をハミルトニアンに導入し、その値を調べる。

$$H = U M U^\dagger + \alpha \cdot V_e$$

- $\alpha=1$ がnominalな物質効果に対応。
- $\alpha=0$ は真空に対応(物質効果無し)。

- Best fit : $\alpha = 1.0$ for NH.
- $\Delta\chi^2 = 5.2$ (vacuum)
- データは物質効果有りをfavor
- 真空(物質効果無し)は 2σ 以上でdisfavor

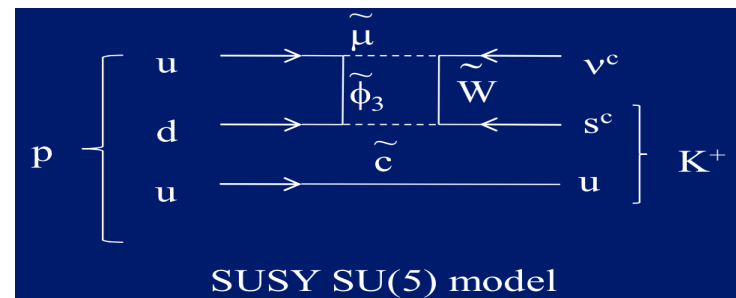
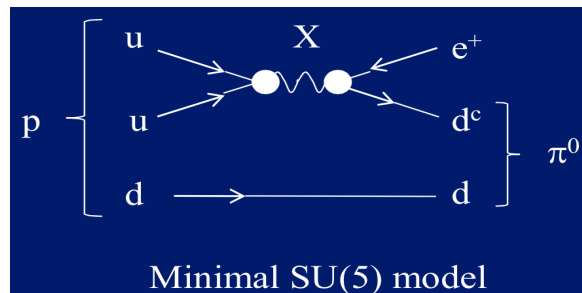
核子崩壊探索

なぜ物質は電氣的に中性か？

= なぜquarkと電子の電荷が整数比なのか？
($|Q_d|, |Q_u|, |Q_e| = 1:2:3$)

素粒子の大統一理論 (Grand Unified Theories, GUTs) はこれらに自然な回答を与える。

同時に核子の不安定性を予言する(核子崩壊)



GUTs はモデルに応じて幾つもの崩壊モードを予言する。
(Di-nucleon decay processes, $NN \rightarrow l + X$ 、なども)

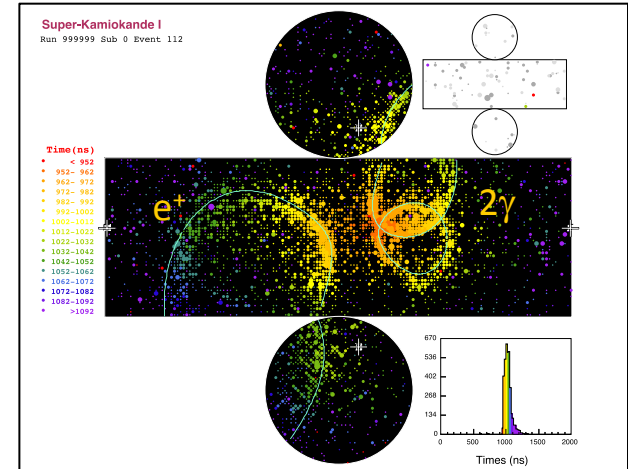
$\rho \rightarrow e\pi^0$ 崩壊モード探索

arXiv:1610.003597, submitted to PRD

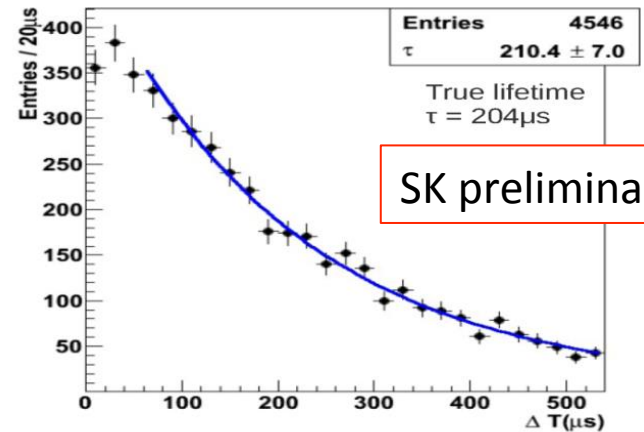
Event Selection:

- All visible particles are contained
- Fiducial Volume cut
- 2 or 3 Cherenkov rings
- All rings are e-like
- no decay electron
- $85\text{MeV}/c^2 < M_{\text{inv}} < 185\text{MeV}/c^2$ (3ring)
- $800\text{MeV}/c^2 < M_{\text{inv}} < 1050\text{MeV}/c^2$
- 全運動量 (P_{tot}) cut
 - $P_{\text{tot}} < 100\text{MeV}/c$ 、
もしくは
 - $100\text{MeV}/c < P_{\text{tot}} < 250\text{MeV}/c$
- no neutron signal (SK-IV only)

MC simulation



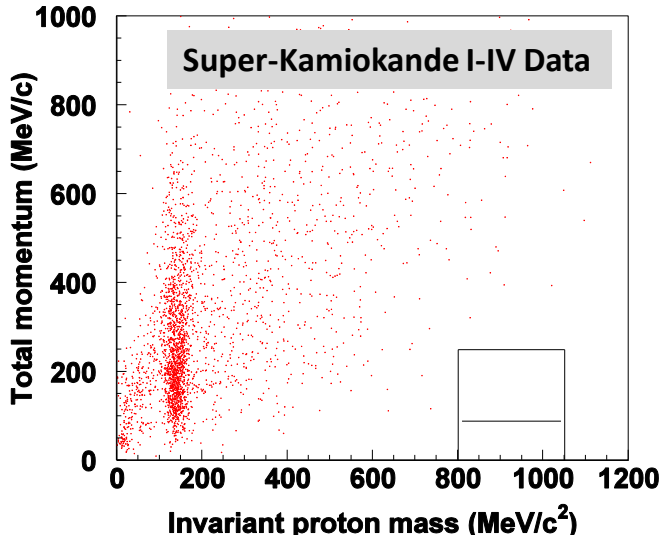
Neutrons in 1297.4 days atmospheric neutrino data



遅延信号を用いて中性子をタグ。
大気ニュートリノ反応(B.G.)は中性子を伴うことが多いので効率よく落とせる。(~50% reduction of B.G.)

解析結果 (2モード)

$p \rightarrow e^+ \pi^0$

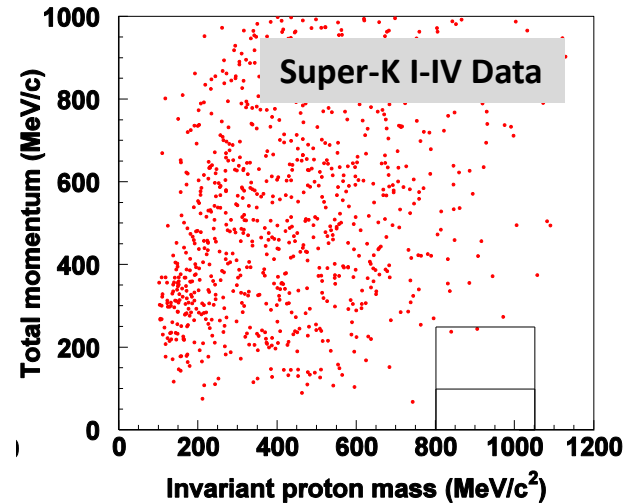


- Signal Efficiency $\sim 40\%$
- No candidate

$\tau/B > 1.6 \times 10^{34}$ year (90% C.L.)

	$P_{tot} < 100 \text{ MeV}/c$	$100 < P_{tot} < 250 \text{ MeV}/c$
Total B.G.s	< 0.07	~ 0.55
Observation	0	0

$p \rightarrow \mu^+ \pi^0$



- Signal Efficiency 30%~40%
- 2 candidates
- 有意なexcessは見られず。

$\tau/B > 7.7 \times 10^{33}$ year (90% C.L.)

	$P_{tot} < 100 \text{ MeV}/c$	$100 < P_{tot} < 250 \text{ MeV}/c$
Total B.G.s	~ 0.05	~ 0.82
Observation	0	2

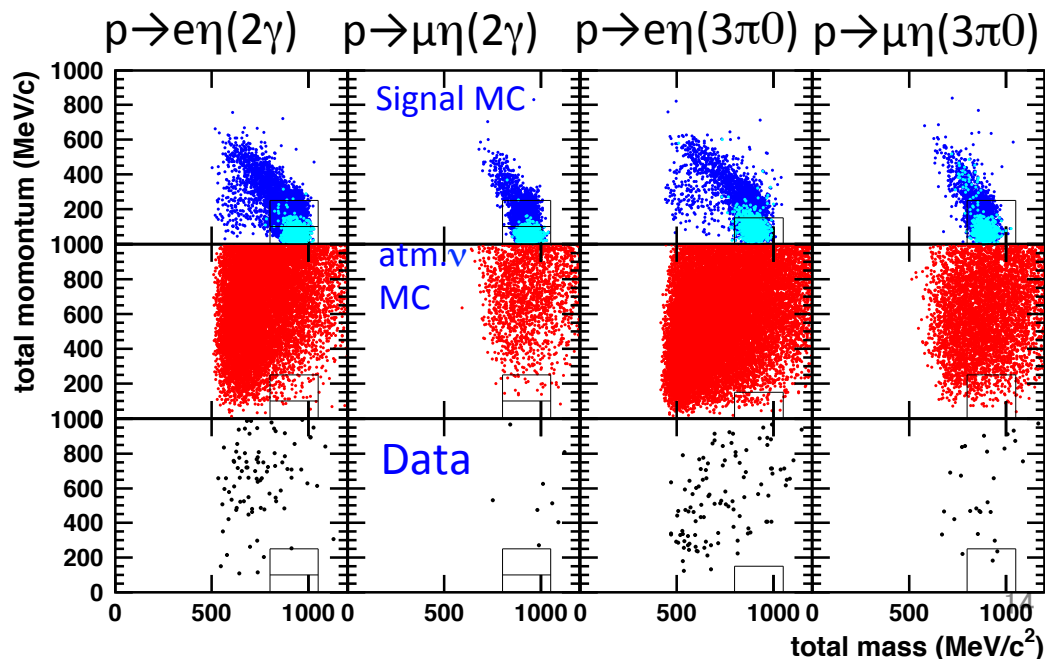
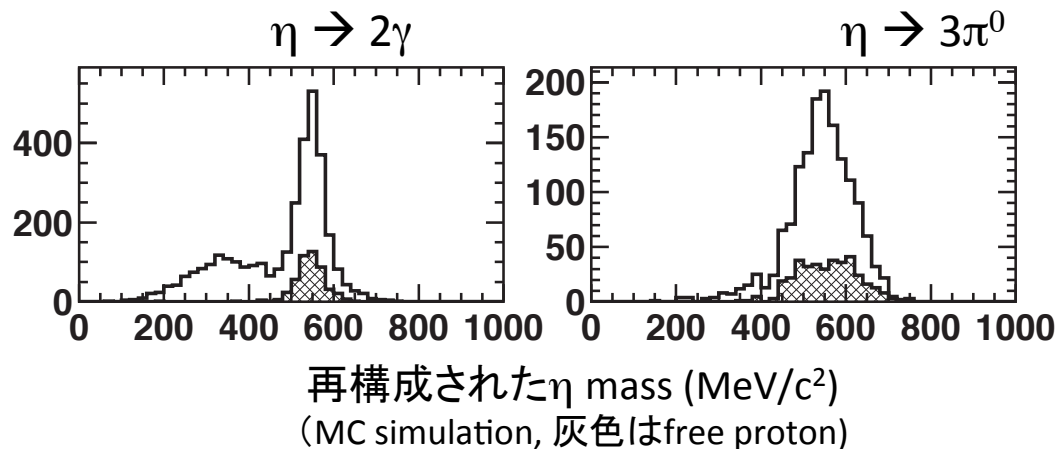
他の Λ^+ +meson崩壊モード探索

終状態に (η, ρ, ω) を含むモードの探索を行った。

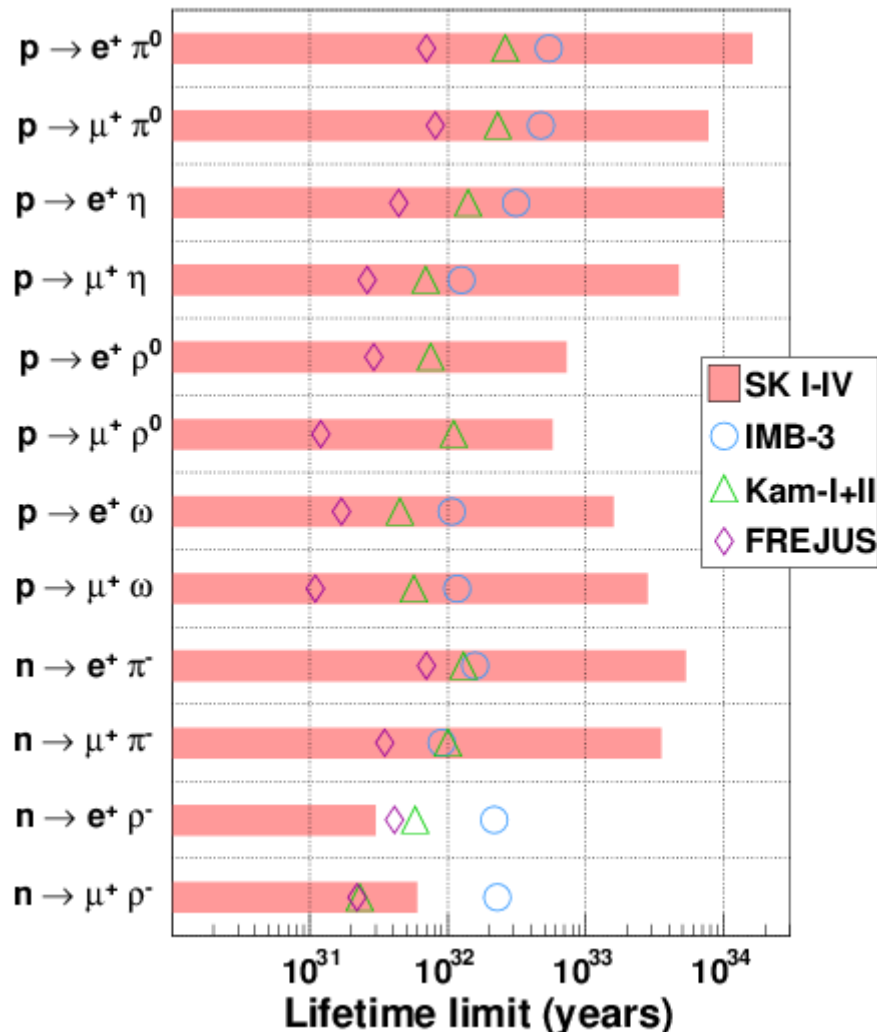
- SK I-IVのデータ(316kton \cdot yr)を用いた解析(前回のpublicationのおよそ2.3倍)
- 前述モード同様に中性子タギングを行うなど解析を改善。
- Total Momentumを二分して解析($\eta \rightarrow 2\gamma$ の場合)

η を含む崩壊モード (316kt \cdot yr)

	B.G.	Observation
$p \rightarrow e\eta$	0.78	0
$p \rightarrow \mu\eta$	0.85	2



様々な核子崩壊モード探索結果



- データはB.G.とコンシステントであった。
- Lifetimeの下限値は過去の結果の factor 2-3 厳しいものであった。
- $n \rightarrow (e, \mu)p$ が低い結果なのは、検出効率が低い、Systematic errorの影響、B.G.rateが高い事、など。
- 結果の詳細は近日投稿予定

まとめ

- スーパーカミオカンデ実験の最新結果(大気ニュートリノ、核子崩壊)について報告した。
- 今年観測20周年を迎えた。今年度も安定した検出器の稼働と研究を進めている。
- 大気ニュートリノによるニュートリノ振動の研究
 - 質量階層性について、Normal Hierarchyの方がInverted Hierarchyよりもfavorされているという結果が得られた。
 - $\Delta\chi^2 = \chi^2(\text{NH}) - \chi^2(\text{IH}) = -4.3$ (SK only)、P-value 0.031 – 0.007 ($\sin^2 2\theta_{23} = 0.6, 0.4$)
- 核子崩壊の探索
 - $p \rightarrow e^+ \pi^0$: No candidate, $\tau/B > 1.6 \times 10^{34}$ year (90% C.L.)
 - $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$: B.G. consistent, $\tau/B > 7.7 \times 10^{33}$ year (90% C.L.)
 - η, ρ, ω を終状態に含むモードの探索
 - 改善された解析と約2倍のデータを用いて探索。
 - 有意な証拠は発見されなかったが、多くのモードに対してFactor 2-3の強い制限を与えた
 - 近く投稿予定