

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解析の現状

田代 拓也 (ICRR)

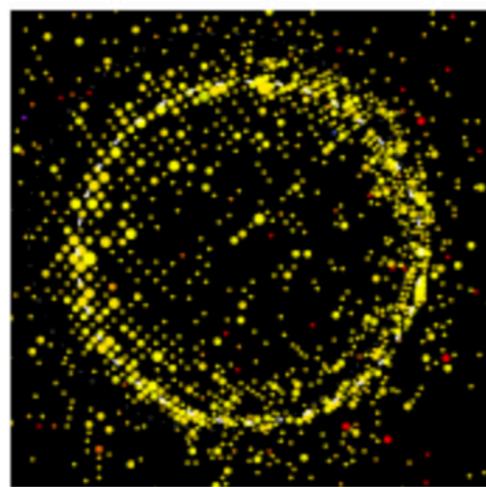
令和3年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会

2022/1/25

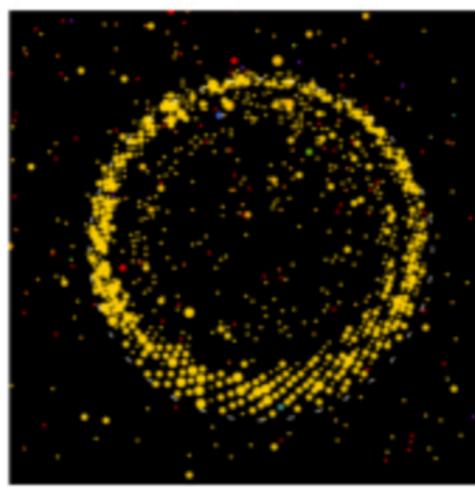
スーパーカミオカンデ実験 (SK)

2

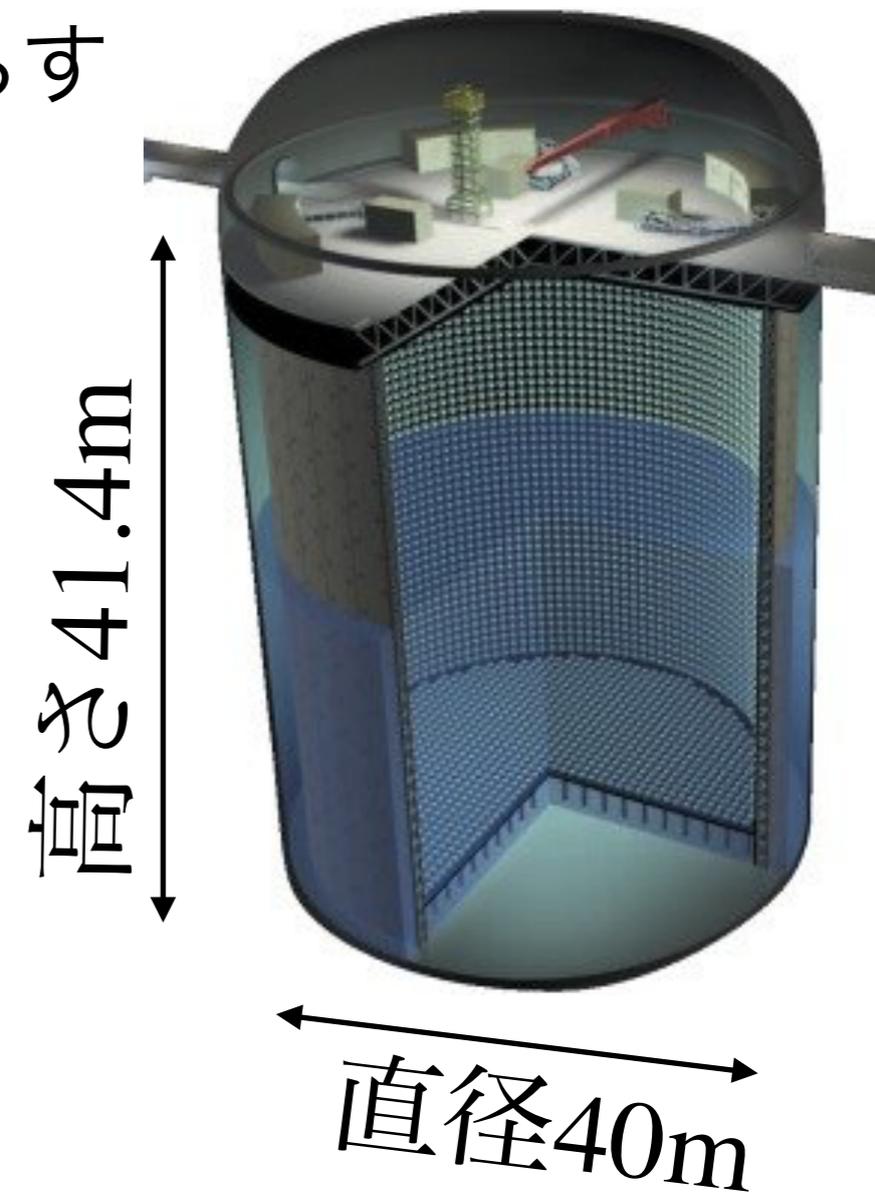
- ▶ 世界最大の水チェレンコフ検出器
- ▶ 岐阜県神岡鉱山の地下1000mに設置
-> 宇宙線ミュオンの影響を極限まで減らす
- ▶ 水中を荷電粒子が光速よりも速く飛ぶ際、チェレンコフ光がリング状に生じる。
- ▶ タンク壁面の光検出器でチェレンコフ光を検出し、その発光パターンや光量などからもとの粒子の種類やエネルギーを再構成



ν_e -like



ν_μ -like



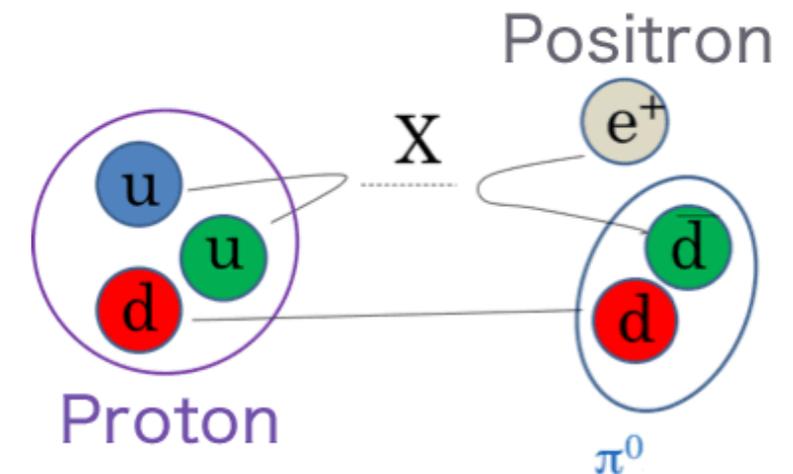
高さ41.4m

直径40m

- ▶ 2020年7月まではタンク内に純水を貯めて運転。それ以降は中性子との反応断面積を高めるため、Gdを溶かして運転

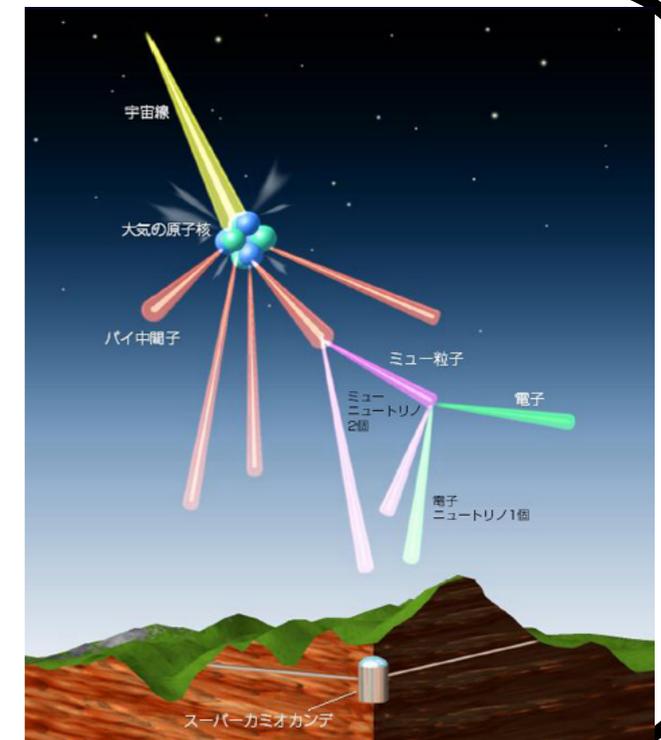
陽子崩壊

- ▶ バリオン数を直接破る過程。
大統一理論などで予言されるが、未発見
- ▶ SKではタンク内の大量の水を観測
するので陽子崩壊探索に有利。
多くの崩壊モードに対して世界最高
感度でリミットをつけている



大気ニュートリノ

- ▶ 1次宇宙線と大気との衝突で生じる
ニュートリノ
- ▶ SKでは10 event/日くらいの頻度で
観測される
- ▶ ニュートリノ振動などの研究に用いられる



陽子崩壊と大気ニュートリノでは検出される粒子のエネルギーが比較的高く、共通の再構成フレームワークを用いている

$p \rightarrow l^+ \eta$ 解析

- ▶ η の崩壊モード($\eta \rightarrow 2\gamma, 3\pi^0$)に分けた解析
- ▶ 過去の解析([Phys. Rev. D 96, 012003 \(2017\)](#))では $p \rightarrow e^+ \eta$ で 10×10^{33} year, $p \rightarrow \mu^+ \eta$ で 4.7×10^{33} yearの寿命上限をつけている(90% CL)
- ▶ 新しい解析では以下のような改良点
 - ▶ 2018年のタンク改修開始前の全データを使用することで、データ量が約15%増加 (0.317 Mt*yr \rightarrow 0.372 Mt*yr)
 - ▶ ηN 反応(η と ^{16}O 内の核子Nが反応し、 $N^*(1535)$ が生成される反応) 断面積の再見積もり

過去の解析では ηN 反応断面積の不定性が大きく、**signal efficiencyに30%近い不定性**を与えていた

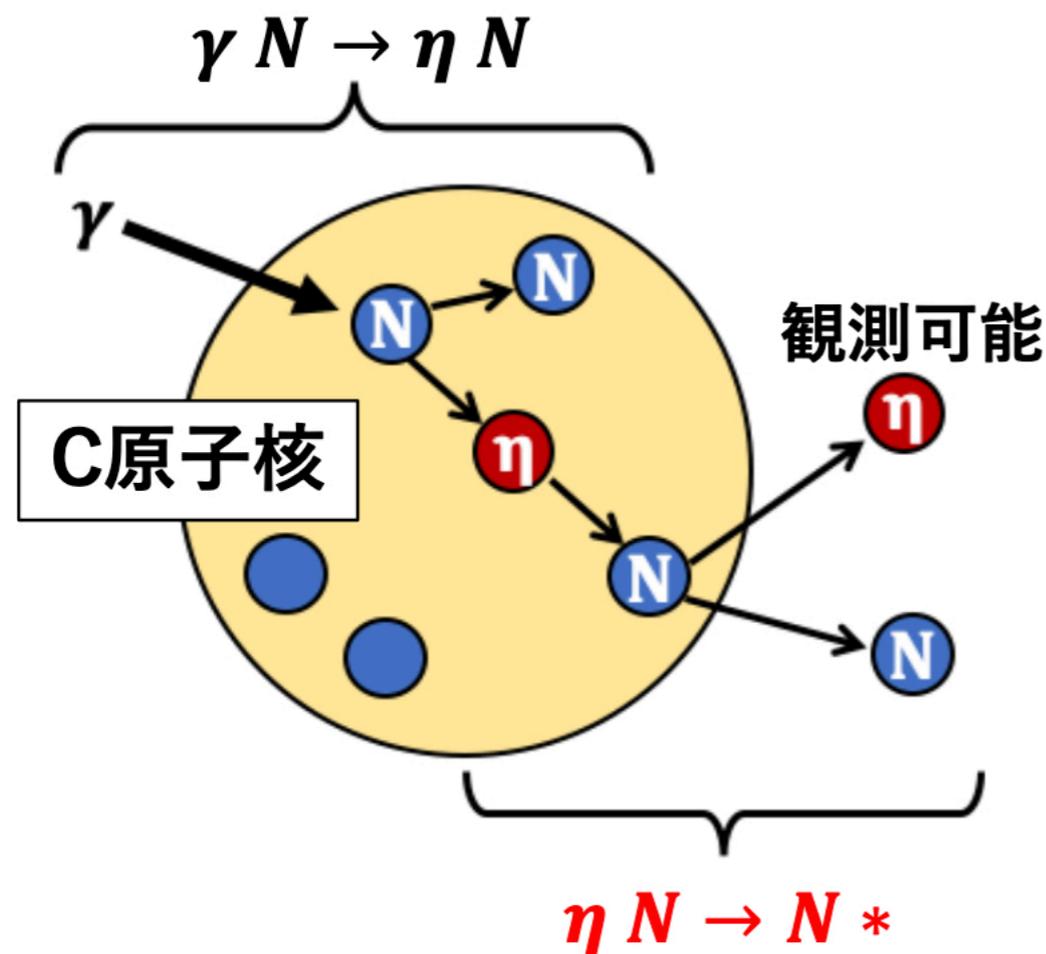
Modes	Meson nuclear effect	Hadron propagation in water	N-N correlated decay	Fermi momentum	Detector performances	Total
$p \rightarrow e^+ \eta$ (2γ , upper)	26	-	8	9	2	29
$p \rightarrow e^+ \eta$ (2γ , lower)	9	-	3	13	2	16
$p \rightarrow e^+ \eta$ ($3\pi^0$)	12	-	4	15	4	20
$p \rightarrow \mu^+ \eta$ (2γ , upper)	27	-	9	10	3	30
$p \rightarrow \mu^+ \eta$ (2γ , lower)	11	-	3	12	3	17
$p \rightarrow \mu^+ \eta$ ($3\pi^0$)	17	-	6	2	5	19

ηN 断面積

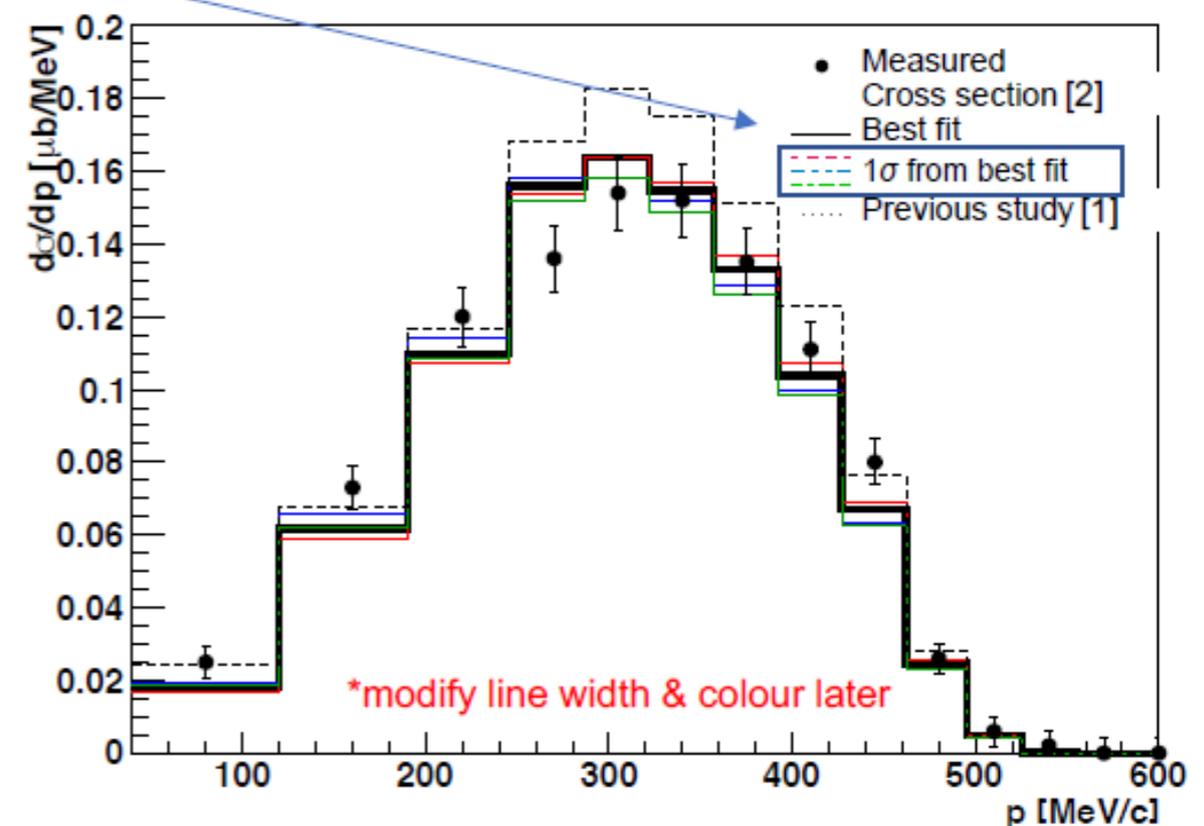
signal efficiencyの不定性 [%] (2017論文より)

ηN 反応断面積の見積もり

- ▶ 12Cを標的としたMAINZ実験(1996)のデータを使用。
核外で観測される η の運動量分布について、 ηN 反応断面積を変えながら作ったシミュレーションとデータを比較し、反応断面積に従来よりも厳しい制限をつける
- ▶ この方法により、 ηN 反応による不定性が**10%程度**まで減少

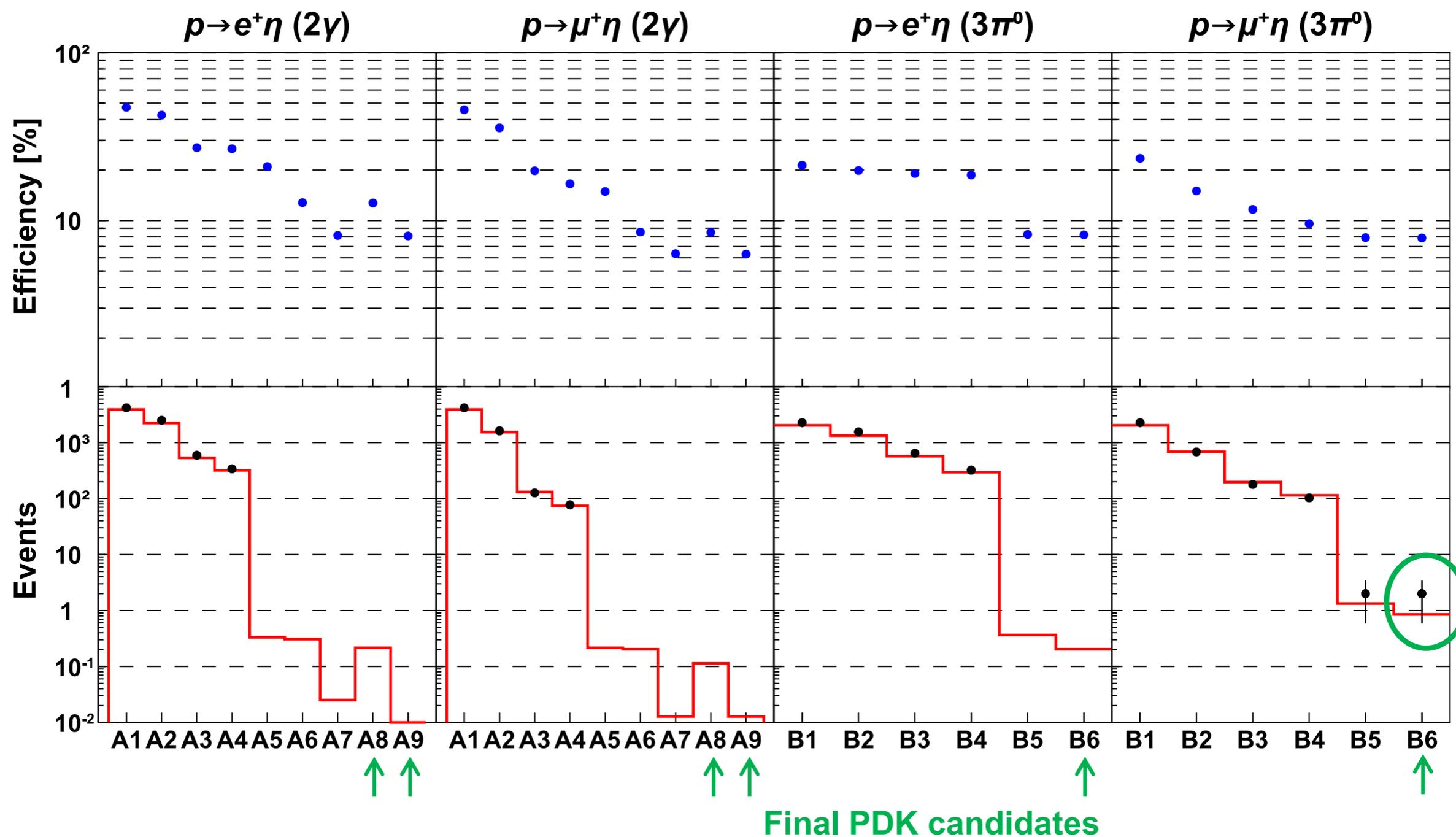


新しい不定性の範囲



2021年度進行中の解析: $p \rightarrow l^+ \eta$

#events in data (SK1~4)
#expected BG events (SK1~4)



2021年度進行中の解析: $p \rightarrow l^+ \eta$

7

Mode	SK-I	SK-II	SK-III	SK-IV	TOTAL
$p \rightarrow e^+ \eta$	#candidate BG rate w/ stat. err.				
$\eta \rightarrow 2\gamma$ Upper	0 (0) 0.08 ± 0.03 (0.17)	0 (0) 0.05 ± 0.01 (0.10)	0 (0) 0.03 ± 0.01 (0.05)	0 (0) 0.05 ± 0.03 (0.13)	0 (0) 0.21 (0.45)
$\eta \rightarrow 2\gamma$ Lower	0 (0) 0 ± 0.006 (0.01)	0 (0) 0.004 ± 0.004 (0.01)	0 (0) 0.003 ± 0.003 (0.003)	0 (0) 0 ± 0.01 (0.01)	0 (0) 0.007 (0.033)
$\eta \rightarrow 3\pi^0$	0 (0) 0.06 ± 0.02 (0.15)	0 (0) 0.06 ± 0.02 (0.06)	0 (0) 0.03 ± 0.01 (0.06)	0 (0) 0.05 ± 0.03 (0.03)	0 (0) 0.20 (0.30)
$p \rightarrow \mu^+ \eta$					
$\eta \rightarrow 2\gamma$ Upper	0 (0) 0.05 ± 0.02 (0.05)	0 (0) 0.04 ± 0.01 (0.02)	0 (0) 0.003 ± 0.003 (0.01)	0 (0) 0.03 ± 0.02 (0.03)	0 (0) 0.08 (0.11)
$\eta \rightarrow 2\gamma$ Lower	0 (0) 0.008 ± 0.008 (0)	0 (0) 0.004 ± 0.004 (0)	0 (0) 0 ± 0.003 (0)	0 (0) 0 ± 0.01 (0)	0 (0) 0.012 (0)
$\eta \rightarrow 3\pi^0$	0 (0) 0.38 ± 0.05 (0.34)	1 (1) 0.17 ± 0.03 (0.13)	0 (0) 0.12 ± 0.02 (0.12)	1 (1) 0.17 ± 0.05 (0.16)	2 (2) 0.84 (0.75)

括弧内は2017論文

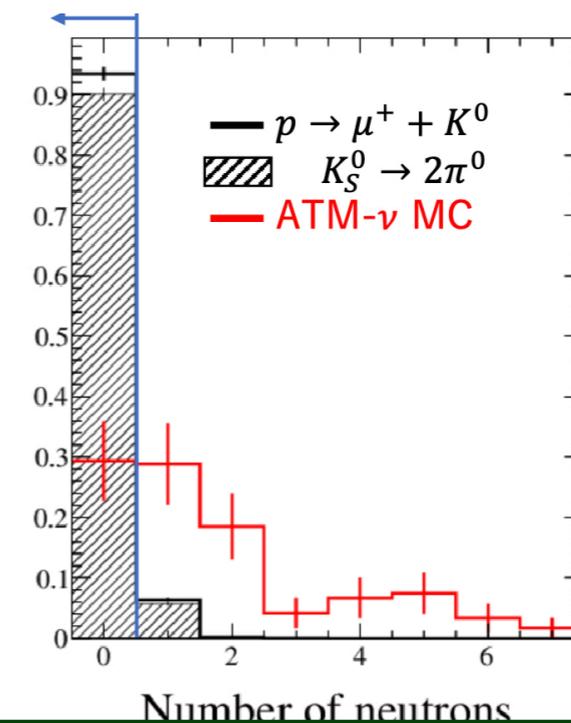
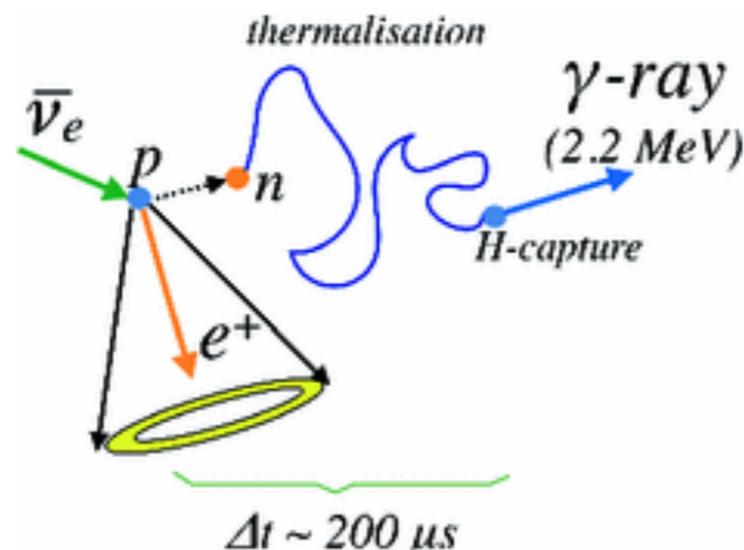
Modes	BG rate [events] w/ systematic err.	Candidate [events]	Probability [%]	Lifetime limit [$\times 10^{33}$ years]
$p \rightarrow e^+ \eta$	0.42 ± 0.13	0	65.7	14.0
$p \rightarrow \mu^+ \eta$	0.93 ± 0.25	2	23.9	7.3

過去のリミットを更新。論文として発表予定

$p \rightarrow \mu^+ K^0$ 解析

- ▶ K^0 の種類(K_S^0 : $\tau \sim 90\text{ps}$, K_L^0 : $\tau \sim 50\text{ns}$)によって信号の様子が異なる
- ▶ 過去の解析([Phys. Rev. D 86, 012006 \(2012\)](#))では 1.6×10^{33} 年の寿命上限をつけている(90% CL)
- ▶ 新しい解析では以下のような改良点
 - ▶ データ量増加
 - ▶ 2012論文: 2008年までにとられたデータ, 0.173 Mt*yr
 - ▶ 今回の解析: 2018年のタンク改修前までの全データ, 0.372 Mt*yr
 - ▶ **再構成手法変更 (次頁に詳細)**
 - ▶ K_L^0 の崩壊モードによって違った解析手法を導入
 - ▶ 中性子タグを事象選別に追加

中性子タグ: $p+n \rightarrow d+\gamma$ (2.2MeV) を利用



新しい再構成手法

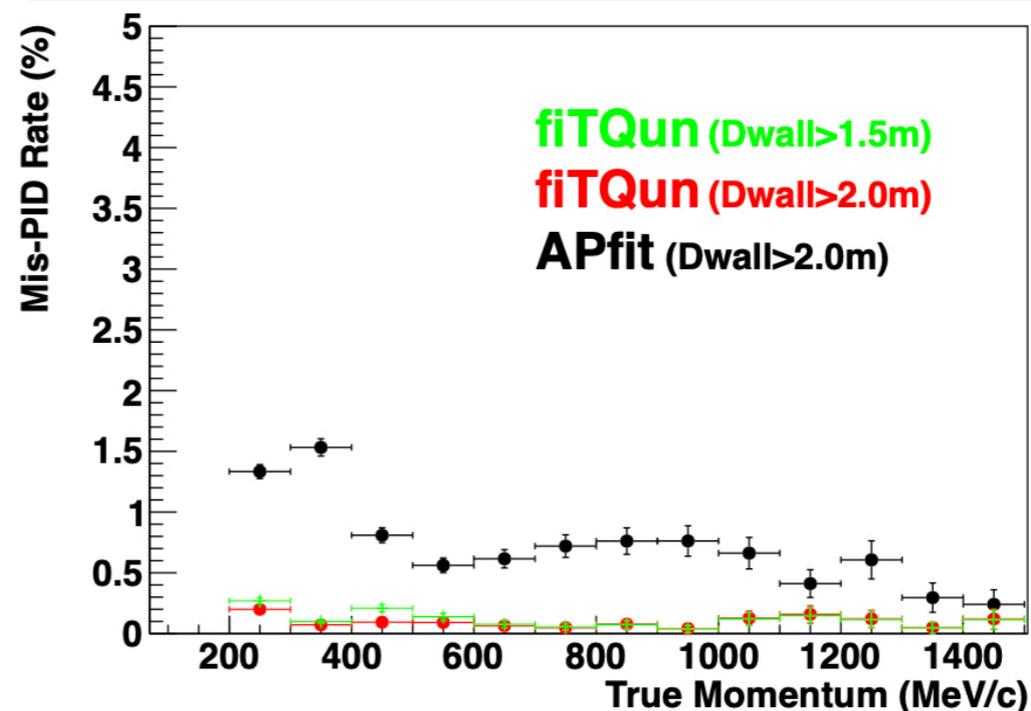
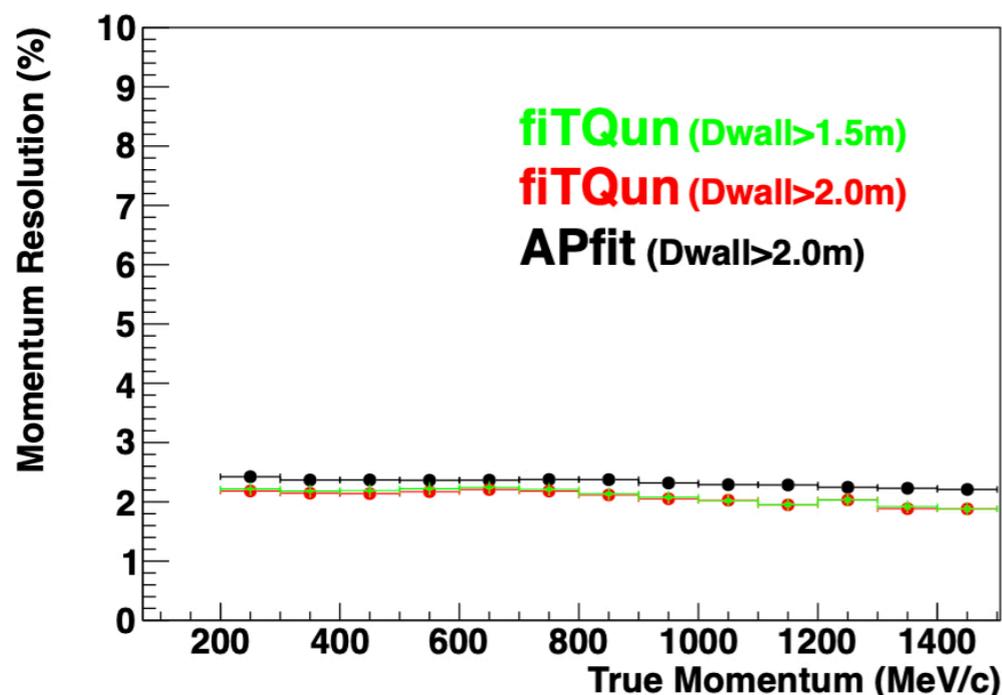
従来の再構成手法: apfit

- ▶ SK運転初期から使用
- ▶ 段階的に情報を再構成
 1. vertex位置再構成
 2. ring数の決定
 3. ringに対するPID
 4. 運動量再構成
 5. Michel electron探索

新しい再構成手法: fiTQun

- ▶ MiniBooneで開発された手法をベースに開発
- ▶ 各PMTのhitの有無, 検出電荷, 検出時間に基づいてlikelihoodを計算。
likelihoodが最大となるように事象を再構成

$$L(\mathbf{x}) = \prod_j^{\text{unhit}} P_j(\text{unhit}|\mathbf{x}) \prod_i^{\text{hit}} \{1 - P_i(\text{unhit}|\mathbf{x})\} f_q(q_i|\mathbf{x}) f_t(t_i|\mathbf{x}).$$



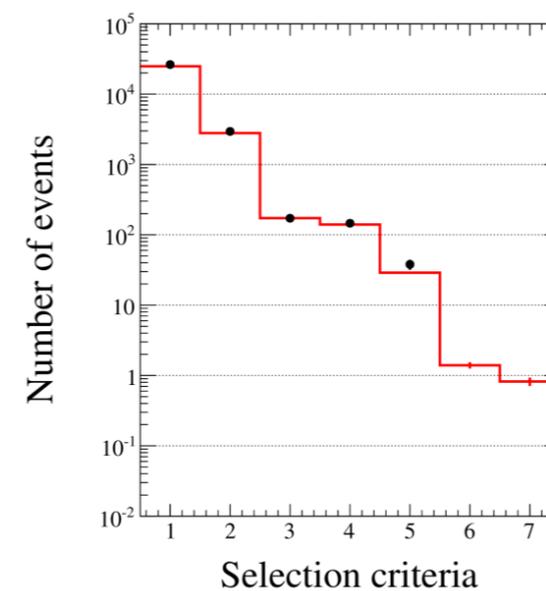
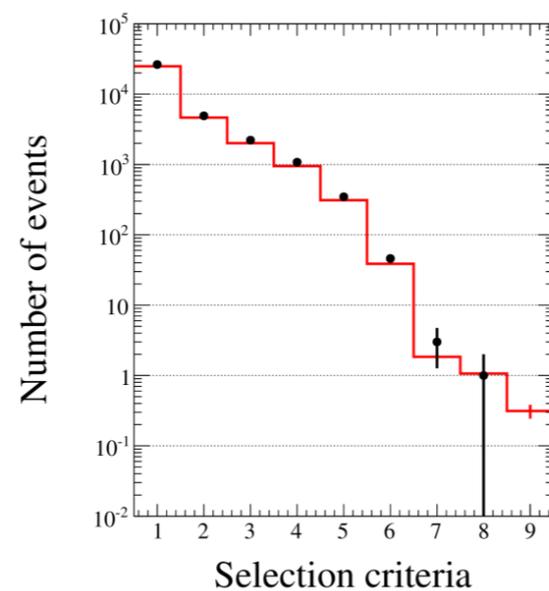
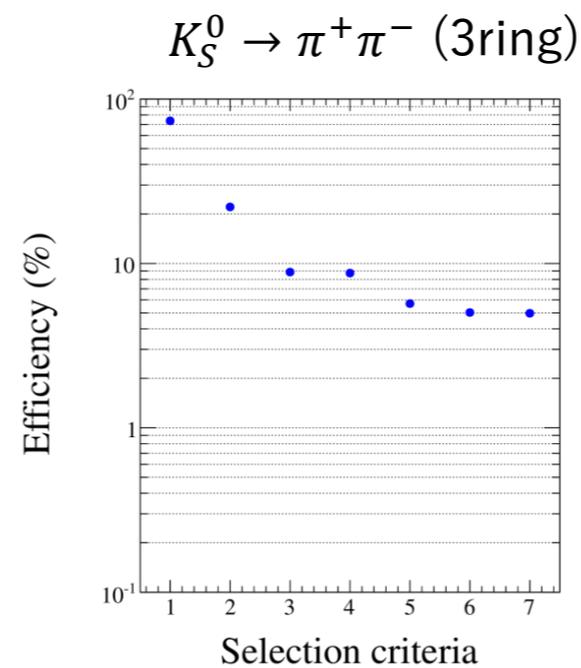
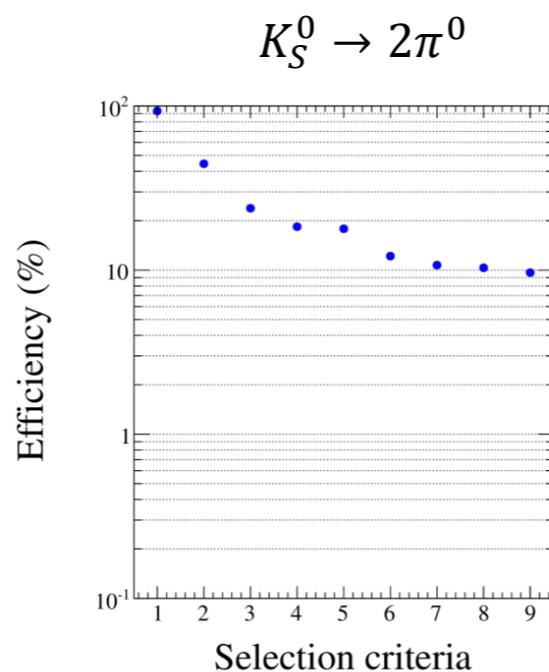
須田さんの博士論文
より引用

2021年度進行中の解析: $p \rightarrow \mu^+ K^0$

Number of Events
at each selection

Official

Signal MC
ATM MC
SK4 data

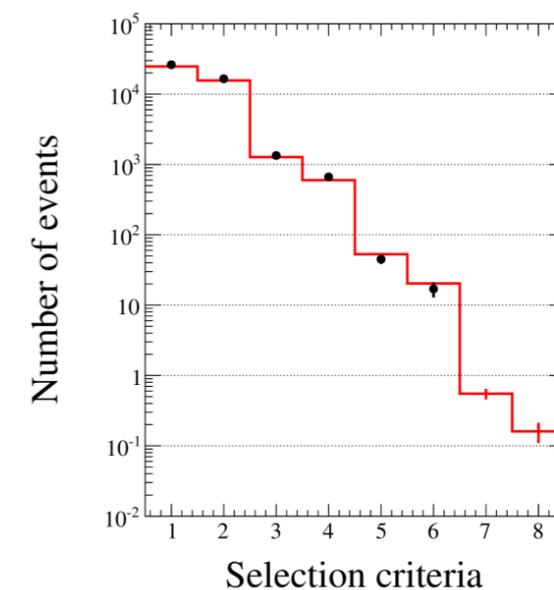
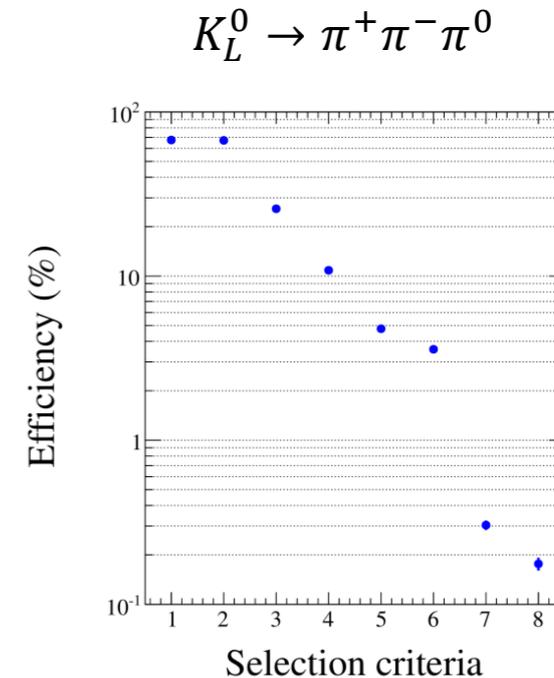
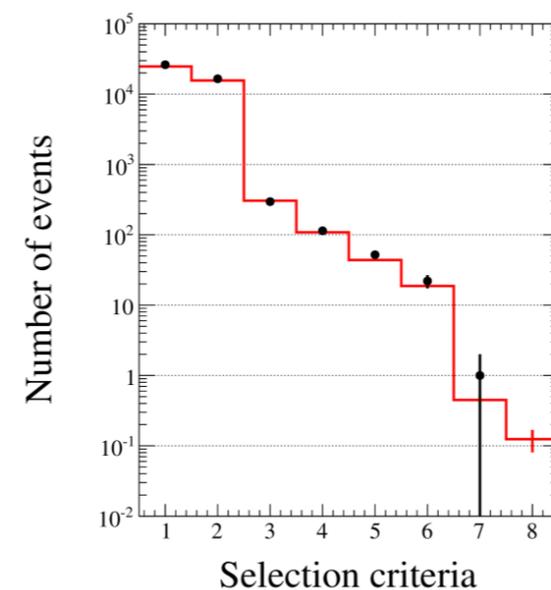
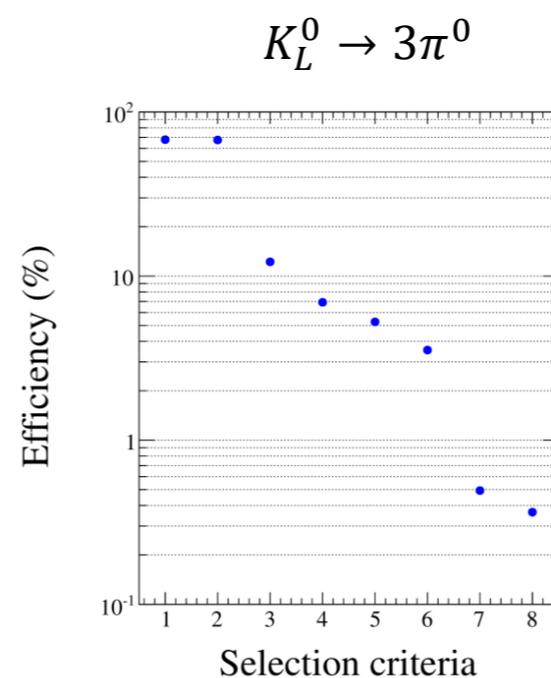
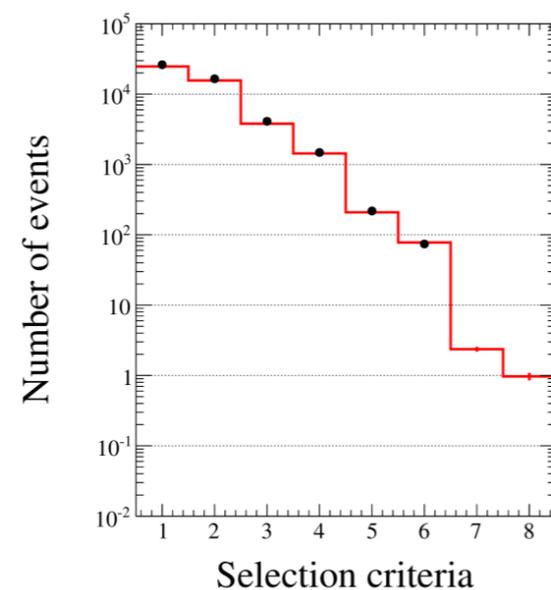
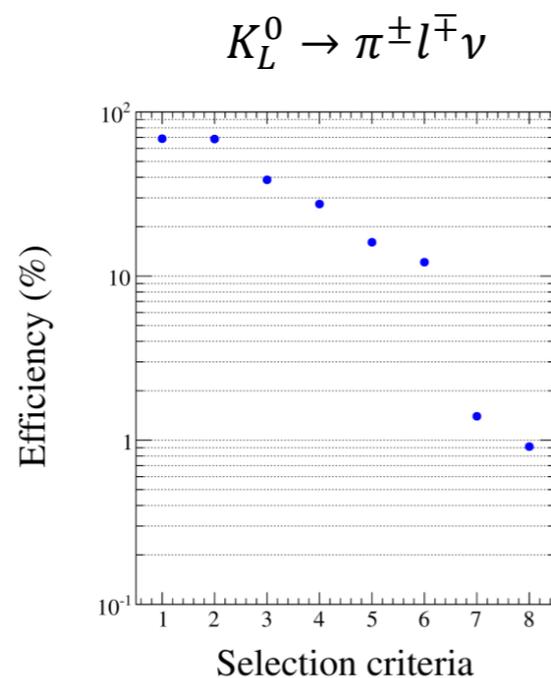


2021年度進行中の解析: $p \rightarrow \mu^+ K^0$

Number of Events
at each selection

Official

Signal MC
ATM MC
SK4 data



Lifetime limits

Official

Mode	Eff. (%)	Expected BG	Candidate	Lifetime limit (10^{33} years)
$K_S^0 \rightarrow 2\pi^0$	9.7 ± 1.1	0.31 ± 0.13	0	2.7
$K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ (3ring)	4.98 ± 0.57	0.8 ± 0.2	0	1.4
$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm l^\mp \nu$	0.91 ± 0.17	1.0 ± 0.3	0	0.2
$K_L^0 \rightarrow 3\pi^0$	0.36 ± 0.05	0.12 ± 0.06	0	0.09
$K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$	0.18 ± 0.04	0.16 ± 0.07	0	0.05

Sensitivity (expectation of lifetime limit) and lifetime limit at 90% C.L. (10^{33} years)

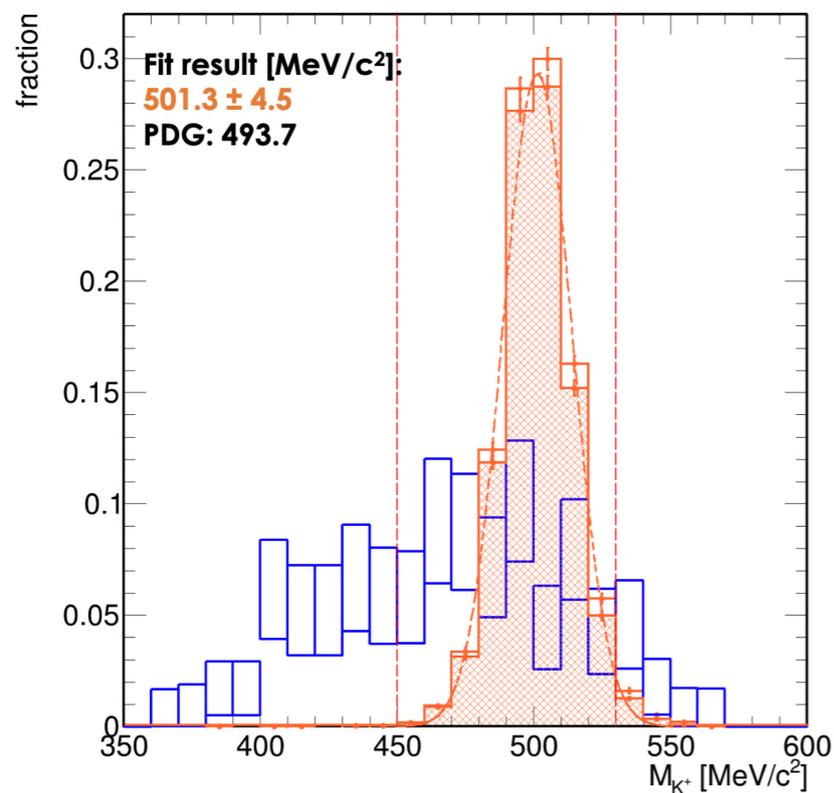
Mode	Sensitivity	Lifetime limit
SK4 combined	2.9	4.5
SK1,2,3 (latest paper w/ enlarged systematic error to cover Kaon bug fix)	1.9	1.2
SK1,2,3,4 combined	3.9	3.6

過去のリミット (1.6×10^{33} 年) を大きく更新。

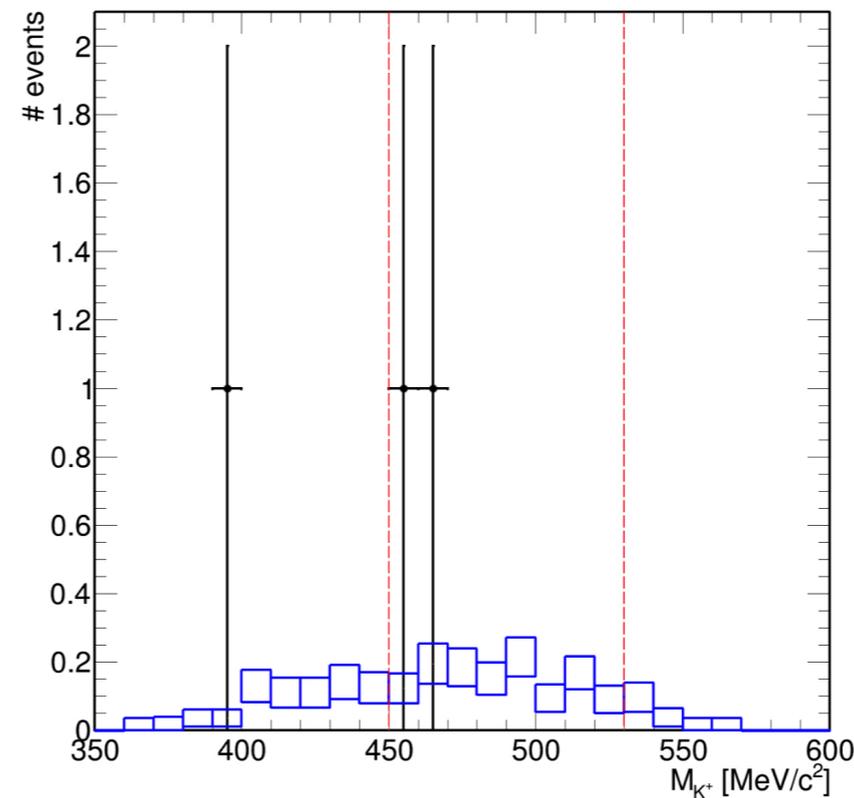
論文として発表予定

$p \rightarrow \nu K^+$ 解析

- ▶ fiTQunで π^+ を再構成することで、 $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$ から K^+ を再構成することを可能とした



SK4 ATM- ν MC
SK4 PDK MC
True $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ (hatching)



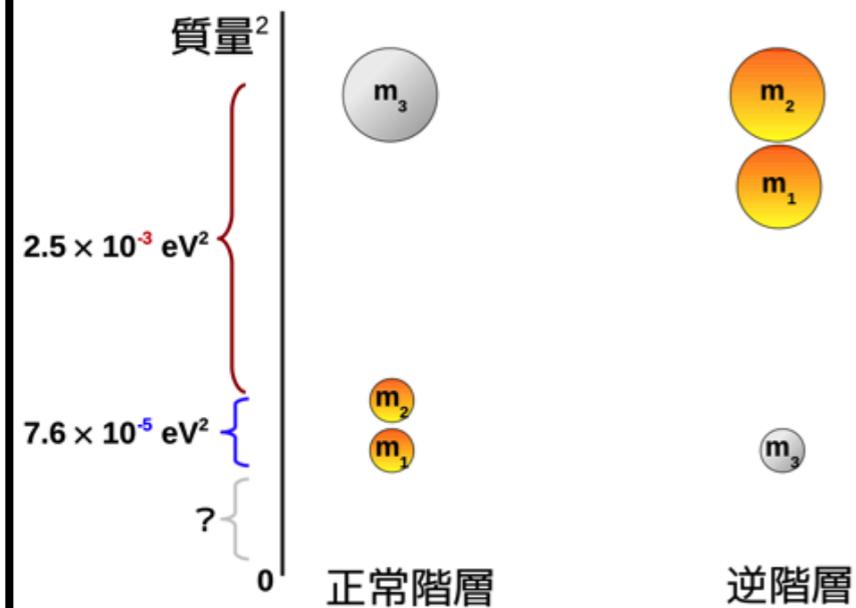
SK4 ATM- ν MC (norm. by lifetime)
SK4 DATA

$p \rightarrow e^+\pi^0\pi^0$ 解析

- ▶ SKでは初めて行われる解析。現在の最高limitはIMB実験がつけている (1.5×10^{32} 年)

- ▶ 大気ニュートリノはニュートリノ振動の未解決問題に対して感度を持つ。
 - ▶ 振動角 $\theta_{23} \sim 45^\circ$ と最大に近い破れ。
 θ_{23} は 45° よりも大きいのか小さいのか? (θ_{23} octant問題)
 - ▶ CPは破れているか? 破れているならCP位相 δ_{CP} の値は?
 - ▶ 質量階層性は順階層(NH)か、それとも逆階層(IH)か?

質量階層性



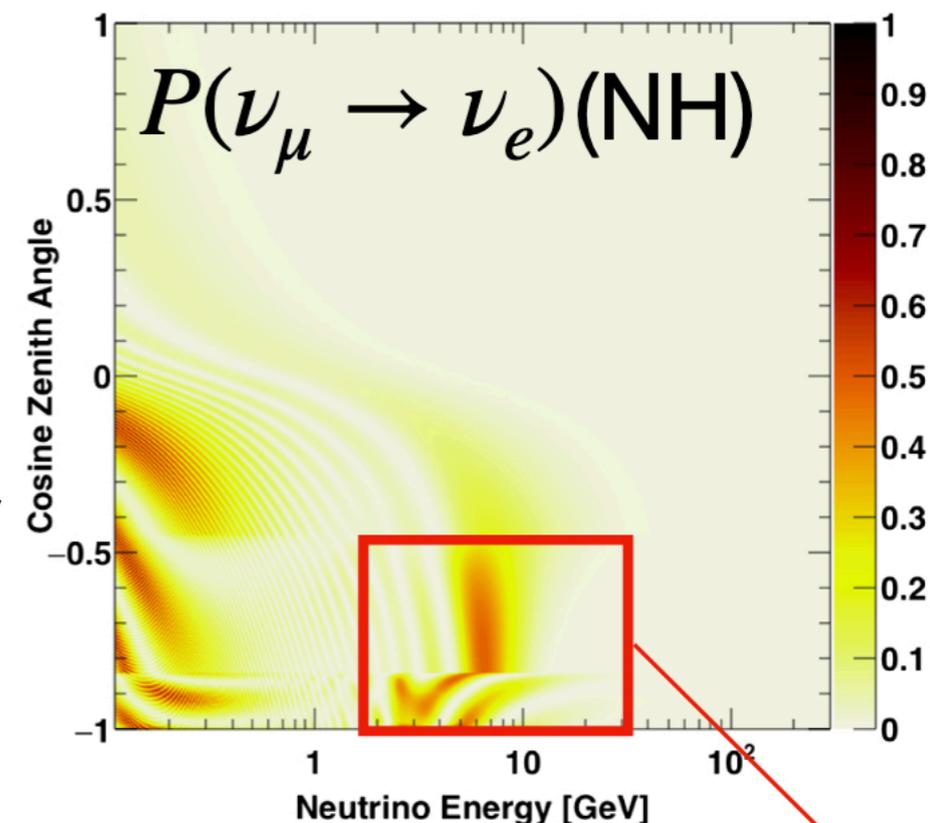
ニュートリノ混合行列

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

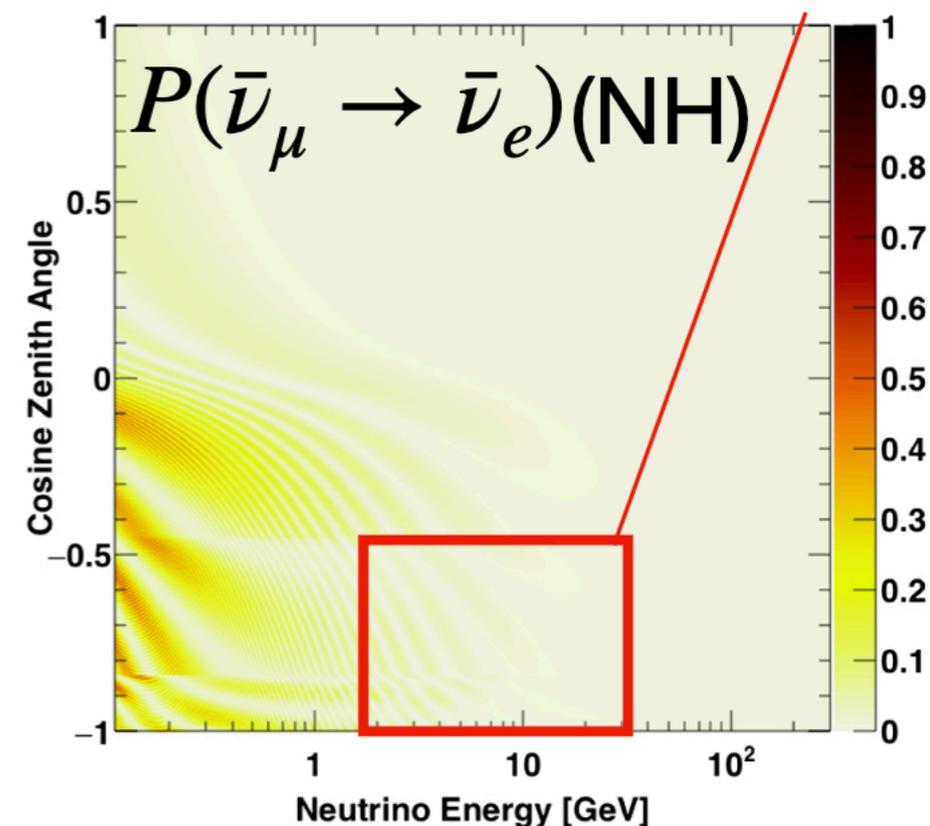
θ_{23} octant問題

CP位相

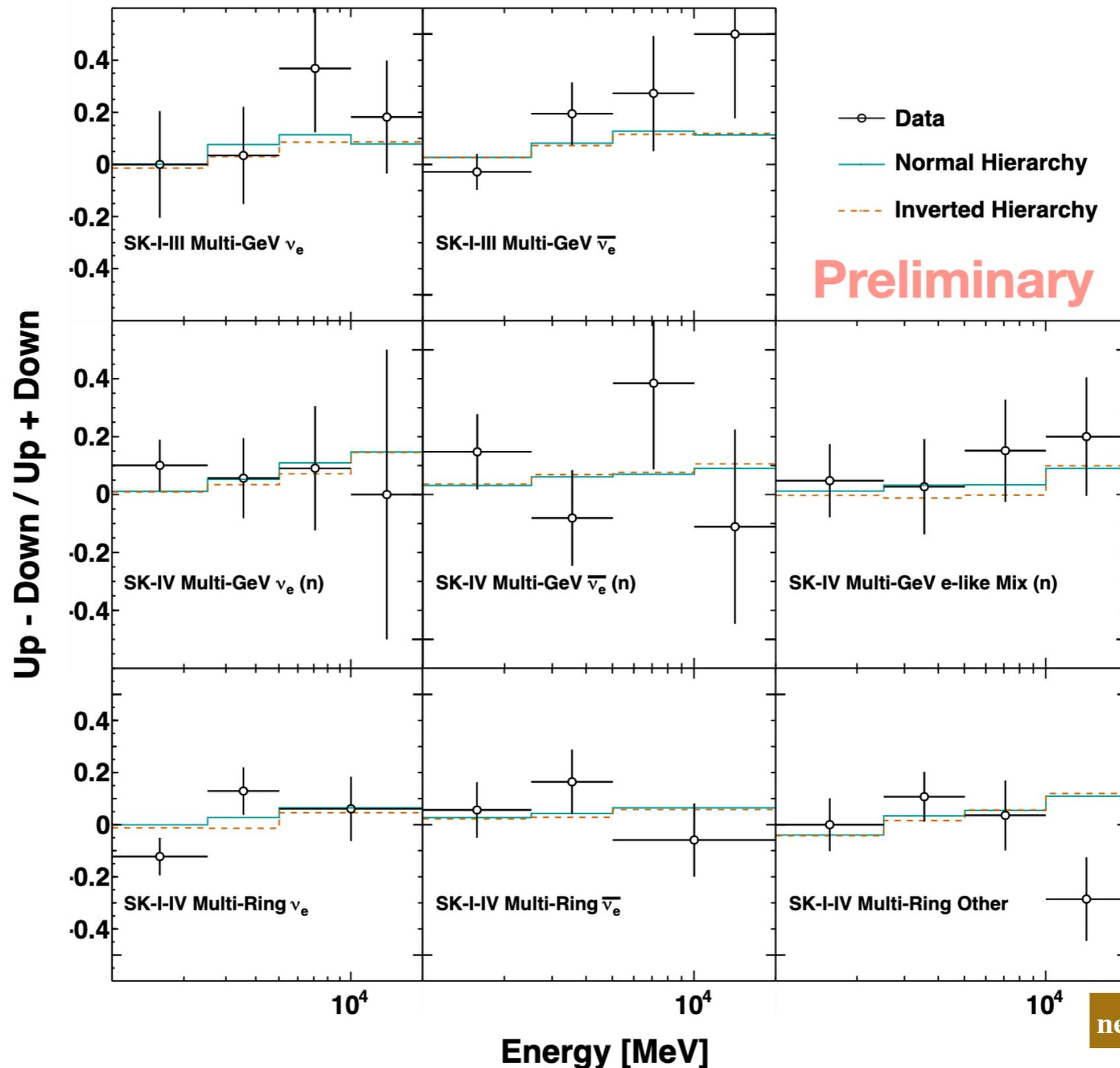
- ▶ SKに上向きに飛来するニュートリノは地球の物質との相互作用により振動確率が変わる(物質効果)
- ▶ 物質効果の影響はニュートリノと反ニュートリノで異なるが、その違いは質量階層性に依存する
 - ▶ NH: ニュートリノの振動確率が大きくなる
 - ▶ IH: 反ニュートリノの振動確率が大きくなる
- ▶ ニュートリノと反ニュートリノそれぞれについて上向きに飛来するものの振動を調べることで物質効果に制限をつけられる
 - ▶ ニュートリノと反ニュートリノの区別には中性子タグを利用



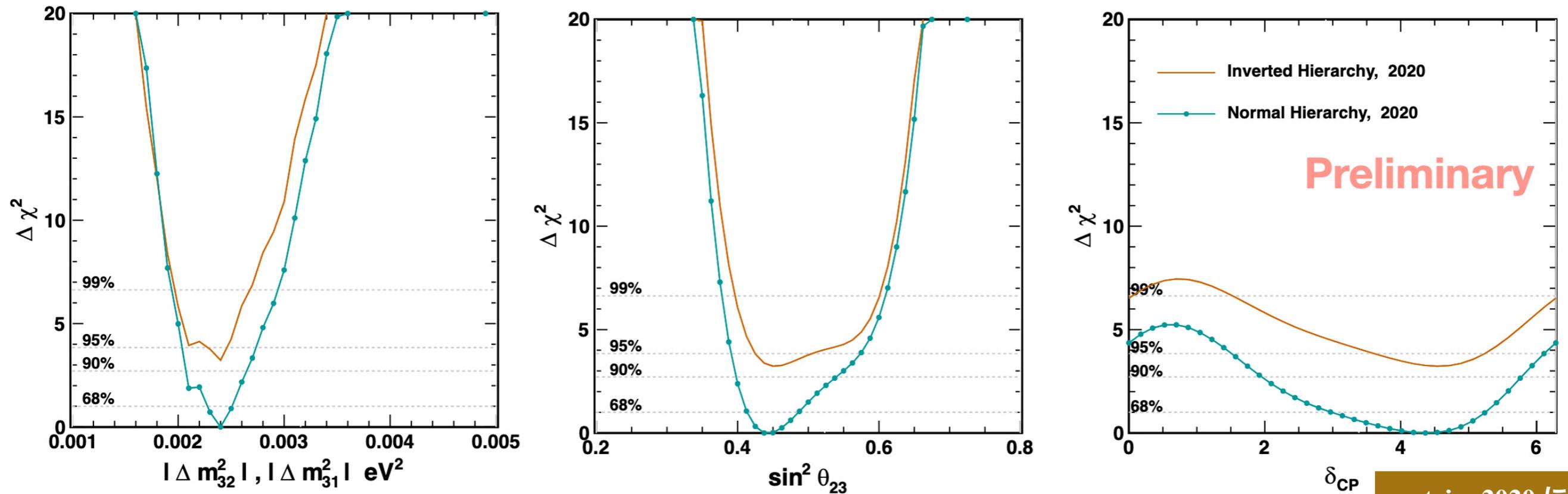
Matter effect



タンク改修前までの364.8 kton*yrのデータを解析



タンク改修前までの364.8 kton*yrのデータを解析



neutrino2020にて発

- ▶ SKでは未解決問題に対して以下の解を支持する
 - ▶ 振動角 $\theta_{23} < 45^\circ$ (1st octant)
 - ▶ CP位相 $\delta_{CP} \sim 3/2 \pi$
 - ▶ 順階層の質量階層性
- ▶ 更に精度の良い結果を得るため、解析の改良を進めている
 - ▶ タンク改修後のデータの使用
 - ▶ Fiducial volumeの拡張(現: 壁から200cm, 新: 壁から100cm)
 - ▶ 中性子タグの精度向上

まとめと今後

- ▶ 陽子崩壊、大気ニュートリノ振動共に新しいデータや手法を用いて解析の更新が進行中
- ▶ $p \rightarrow \mu^+ K^0$ 探索では新しい再構成手法(fiTQun)を導入し、崩壊モードごとに解析を最適化。
陽子寿命に 3.6×10^{33} 年の下限をつけた
- ▶ $p \rightarrow l^+ \eta$ 探索ではMAINZ実験のデータを利用することで η と核子の相互作用断面積の不定性とそれに伴うsignal efficiencyの不定性を大幅に削減。
陽子寿命に 14.0×10^{33} 年($p \rightarrow e^+ \eta$), 7.3×10^{33} 年($p \rightarrow \mu^+ \eta$)の下限をつけた
- ▶ その他の崩壊モード探索も進行中
- ▶ 大気ニュートリノ振動解析では θ_{23} 1st octant, $\delta_{CP} \sim 3/2 \pi$, 順階層性を支持する結果が得られている。
より多くの観測データや精度の良い中性子タグを用いることで観測値の更新を目指している

Backup

$p \rightarrow l^+ \eta$ event selection

- ✓ Same event selections as 2017's paper[1].

$p \rightarrow l^+ \eta,$
 $\eta \rightarrow 2\gamma$ mode

Two-box momentum
separation.
(upper/lower box)

Event cut		$p \rightarrow e^+ \eta, \eta \rightarrow 2\gamma$	$p \rightarrow \mu^+ \eta, \eta \rightarrow 2\gamma$
A	The number of rings	3	3
B	PID	all shower-like	one non-shower-like, two shower-like
C	Invariant η mass (m_η)	$480 \leq m_\eta \leq 620$	$480 \leq m_\eta \leq 620$
D	The number of Michel electrons	0	1
E	The total momentum (p_{tot}), the total invariant mass (m_{tot})	$p_{\text{tot}} \leq 250$ $800 \leq m_{\text{tot}} \leq 1050$	$p_{\text{tot}} \leq 250$ $800 \leq m_{\text{tot}} \leq 1050$
F	The total momentum (p_{tot})	$100 < p_{\text{tot}} \leq 250$	$100 < p_{\text{tot}} \leq 250$
H	The number of neutrons	0	0
G	The total momentum (p_{tot})	$p_{\text{tot}} \leq 100$	$p_{\text{tot}} \leq 100$
I	The number of neutrons	0	0

$p \rightarrow l^+ \eta,$
 $\eta \rightarrow 3\pi^0$ mode

Event cut		$p \rightarrow e^+ \eta, \eta \rightarrow 3\pi^0$	$p \rightarrow \mu^+ \eta, \eta \rightarrow 3\pi^0$
A	The number of rings	4 or 5	4 or 5
B	PID	all shower-like	one non-shower-like, the others shower-like
C	Invariant η mass (m_η)	$400 \leq m_\eta \leq 700$	$400 \leq m_\eta \leq 700$
D	The number of Michel electrons	0	1
E	The total momentum (p_{tot}), the total invariant mass (m_{tot})	$p_{\text{tot}} \leq 150$ $800 \leq m_{\text{tot}} \leq 1050$	$p_{\text{tot}} \leq 250$ $800 \leq m_{\text{tot}} \leq 1050$
F	The number of neutrons	0	0

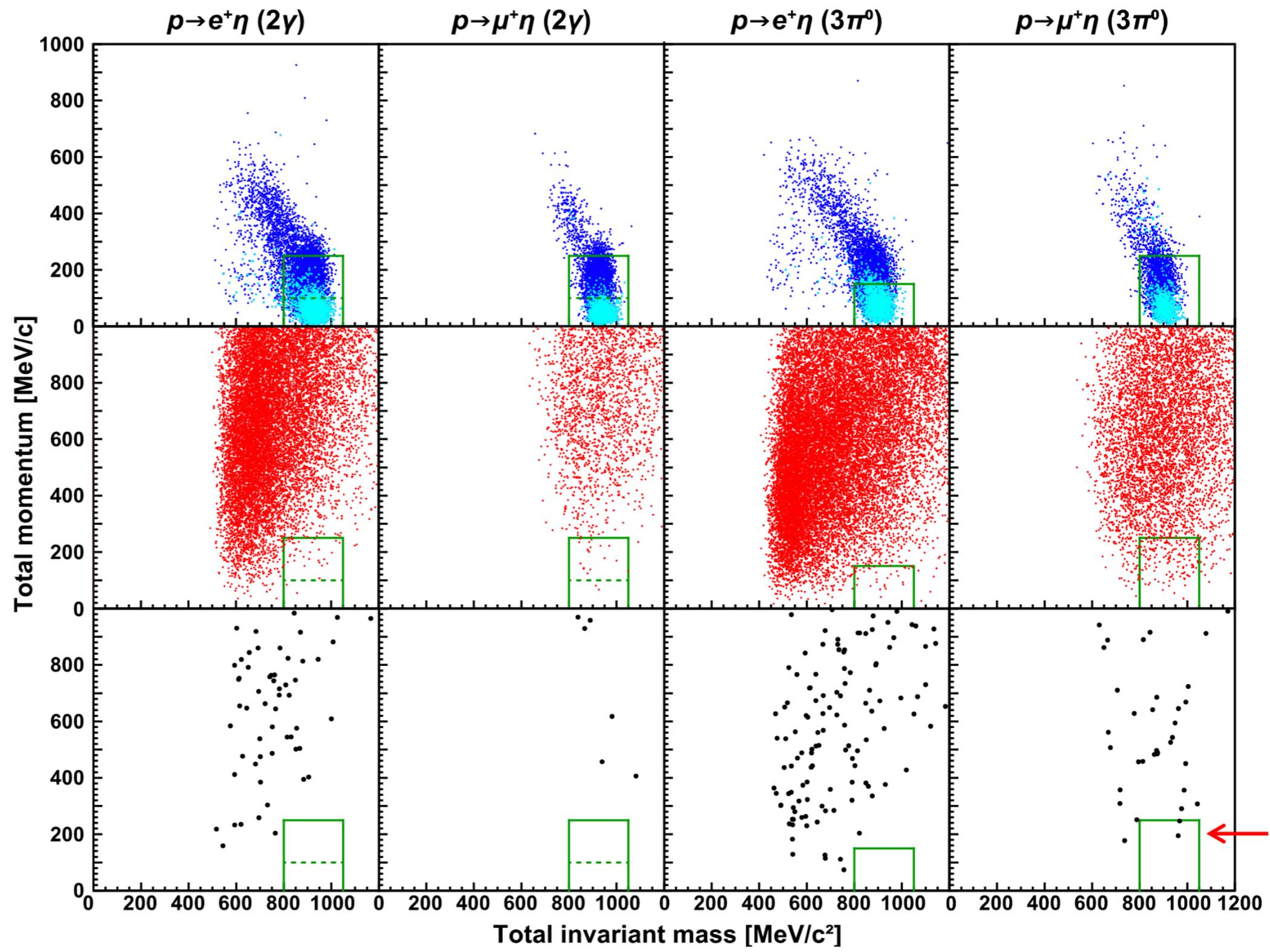
$p \rightarrow l^+ \eta$ signal region

*Cuts applied except for those on p_{tot} and m_{tot}

Proton decay MC
(SKI-IV combined,
40000 events)
-Bound proton
-Free proton

Atm. ν MC
(SKI-IV combined,
2000 yrs.)

Combined
SKI-IV data
(0.372 Mt*yr.
exposure)



p -> μ⁺K⁰ event selection

$K_S^0 \rightarrow 2\pi^0$	$K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-(3ring)$	$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm l^\mp \nu$	$K_L^0 \rightarrow 3\pi^0$	$K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$
1: FCFV	1: FCFV	1: FCFV	1: FCFV	1: FCFV
2: $3 \leq N_{ring} \leq 5$	2: $N_{ring} = 3$	2: $500 < p_{tot} < 8000$	2: $500 < p_{tot} < 8000$	2: $500 < p_{tot} < 8000$
3: 1 μ-like	3: 3 μ-like ring	3: $N_{ring} = 2,3$	3: $4 \leq N_{ring} \leq 6$	3: $N_{ring} = 3,4$
4: $N_{decay-e} = 1$	4: $N_{decay e} = 1,2$	4: 0,1 e-like ring	4: 1 μ-like ring	4: 2 e-like ring
5: $150 < p_\mu < 400$	5: $450 < m_K < 550$	5: $N_{decay e} = 2,3$	5: $N_{decay e} = 1$	5: $N_{decay e} = 2,3$
6: $400 < m_K < 600$	6: $p_{tot} < 300$	6: $260 < p_\mu < 410$	6: $260 < p_\mu < 410$	6: $260 < p_\mu < 410$
7: $p_{tot} < 300$	7: $800 < m_p < 1050$	7: $1.5 < v_{sep} \text{ (m)}$	7: $1.5 < v_{sep} \text{ (m)}$	7: $1.5 < v_{sep} \text{ (m)}$
8: $800 < m_p < 1050$		8: # of neutrons=0	8: # of neutrons=0	8: # of neutrons=0
9: # of neutrons=0				