

Search for Proton Decay  
via  $p \rightarrow e^+ \pi^0$  and  $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$   
in a Large Water Cherenkov Detector

DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.141801

- ◆ イントロダクション
- ◆ スーパーカミオカンデ
- ◆ 解析
- ◆ 結果
- ◆ まとめ

2010/06/15

鈴木 善明

# イントロダクション

- 標準理論では陽子は崩壊しない。
- 電弱相互作用と強い相互作用を統一する大統一理論のゲージ群は $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ を内包。
  - minimal SU(5)
  - minimal SUSY SU(5)
  - SUSY SO(10)                   ...etc.
- 大統一理論 (GUTs, grand unified theories) ではクォーク・レプトンの区別をしない。  
⇒レプトン数・バリオン数非保存、陽子崩壊の予言。

## 本論文のテーマ

$p \rightarrow e^+\pi^0$ 、 $p \rightarrow \mu^+\pi^0$ の過程での陽子崩壊の部分寿命の測定

# スーパーカミオカンデ

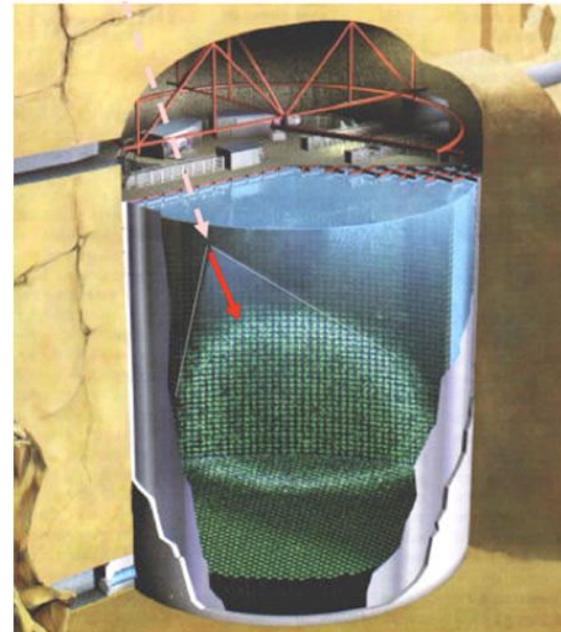
1983~ カミオカンデ

**Kamioka Nucleon Decay Experiment**

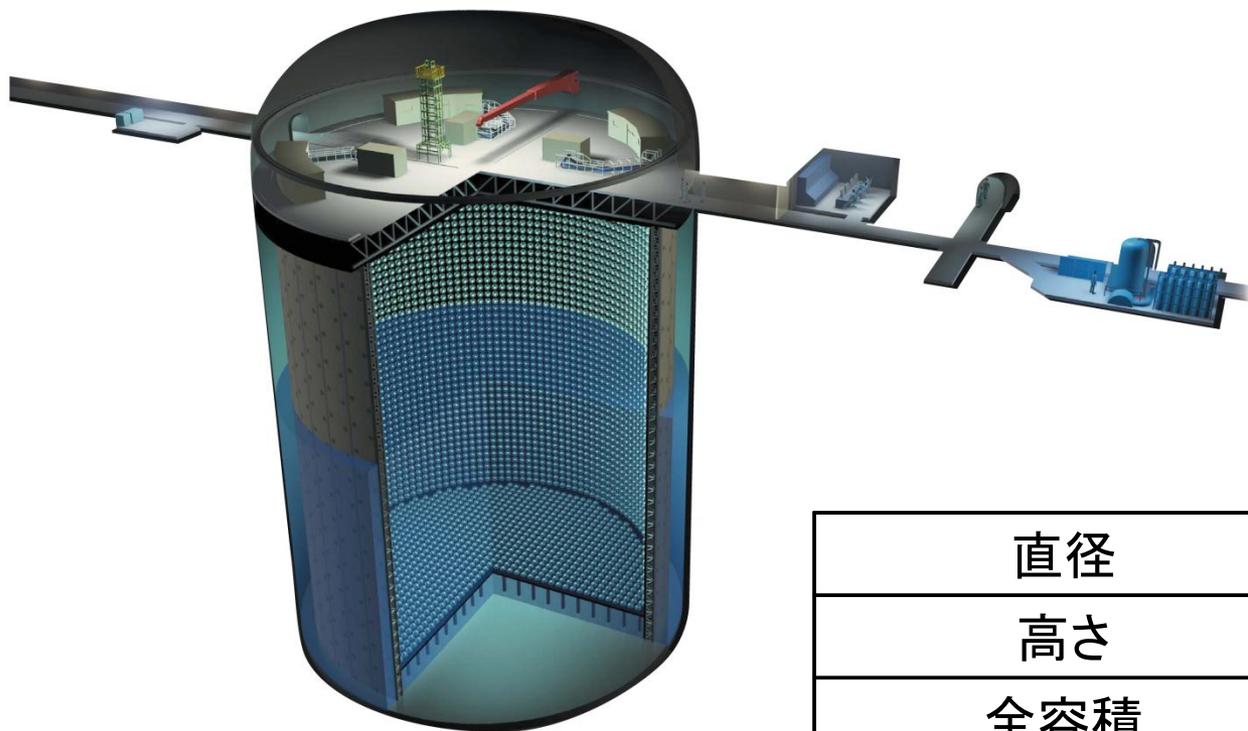
1996~ スーパーカミオカンデ

**SUPER Kamioka Nucleon Decay Experiment**

**SUPER Kamioka Neutrino Detection Experiment**

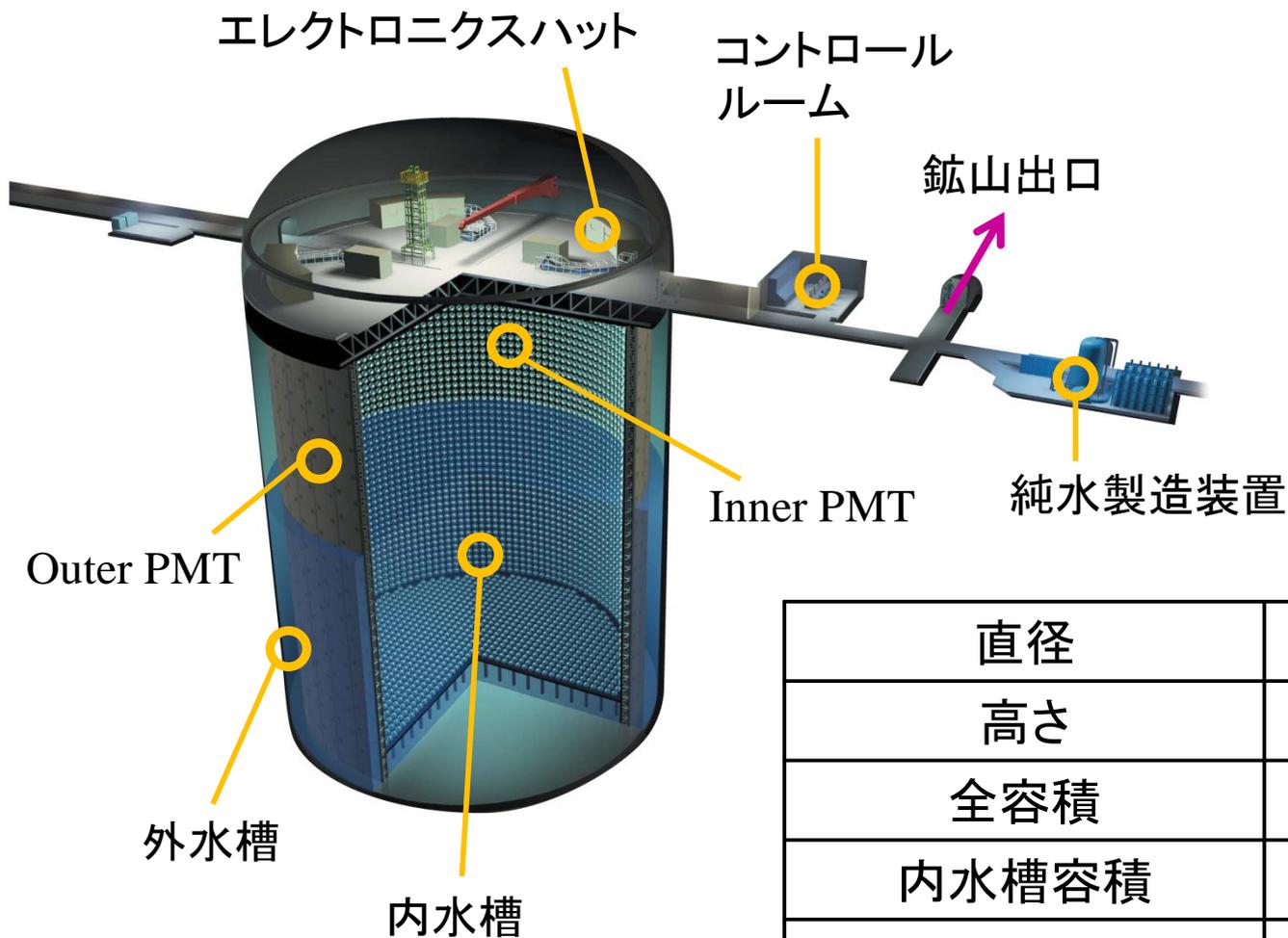


# スーパーカミオカンデ



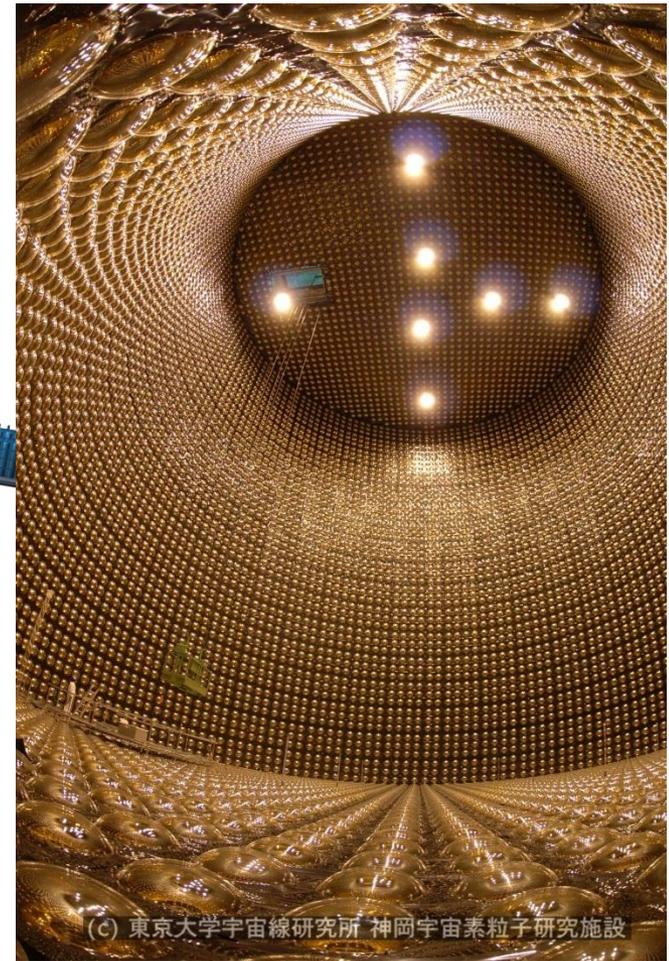
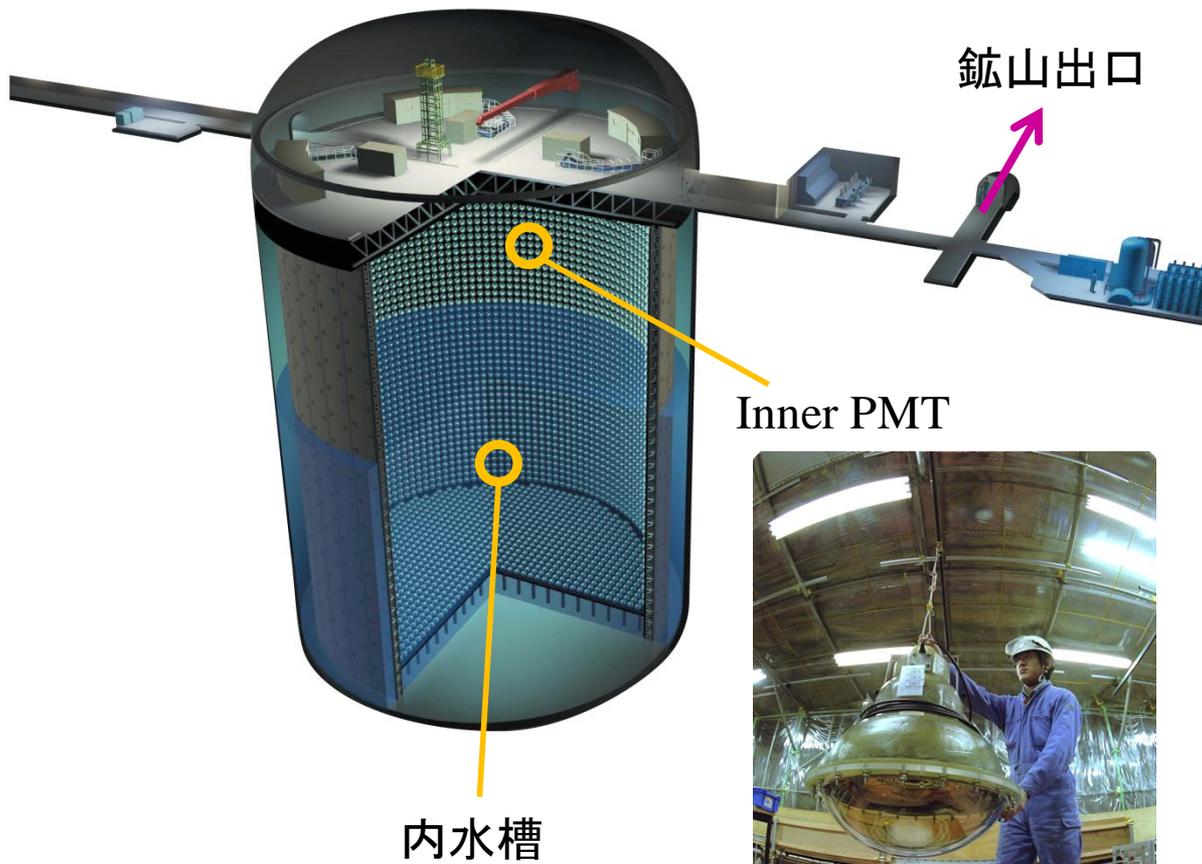
直径	39.3 [m]
高さ	41.4 [m]
全容積	純水: 50 [kt]
内水槽容積	純水: 22.5 [kt]
Inner PMT (20inch)	11,129 [個] (SK-III ~ )
Outer PMT (8inch)	1,885 [個]

# スーパーカミオカンデ

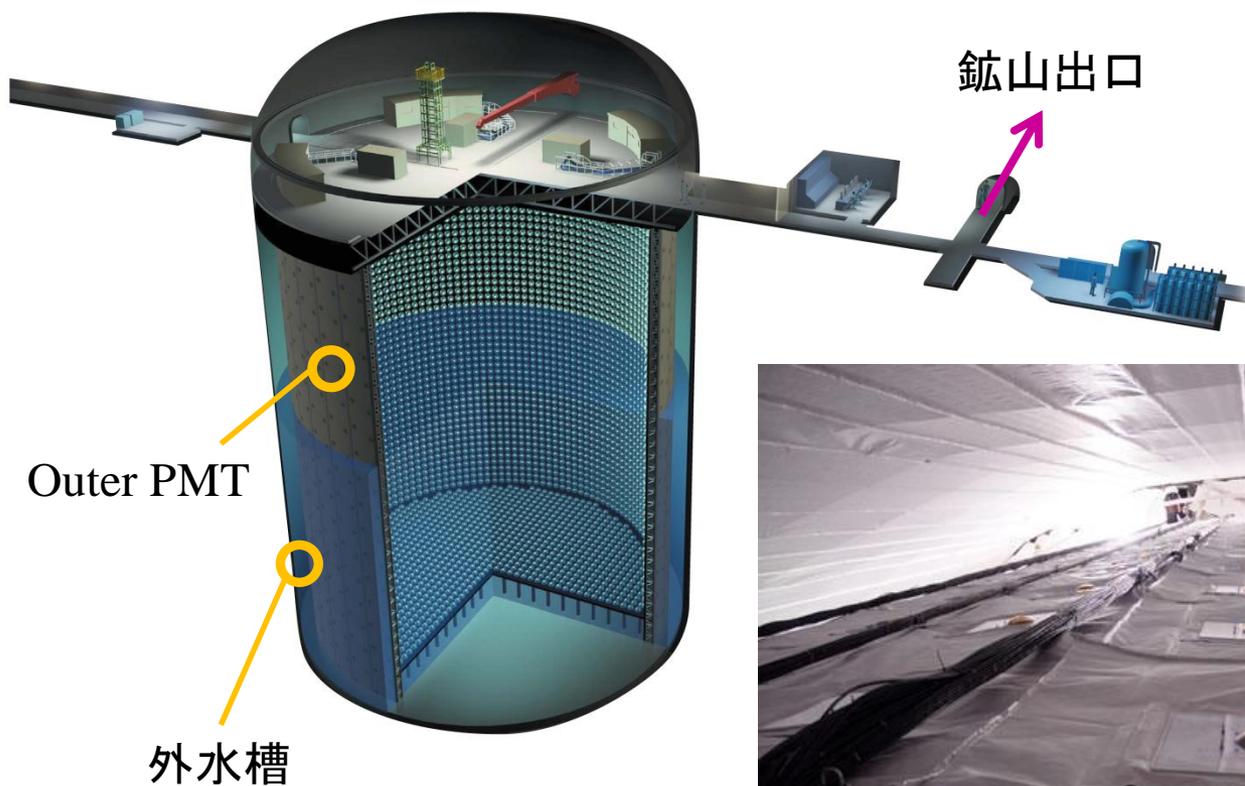


直径	39.3 [m]
高さ	41.4 [m]
全容積	純水: 50 [kt]
内水槽容積	純水: 22.5 [kt]
Inner PMT (20inch)	11,129 [個] (SK-III ~ )
Outer PMT (8inch)	1,885 [個]

# スーパーカミオカンデ



# スーパーカミオカンデ



- 外からの $\mu$ を識別
- 岩石からの $n, \gamma$ を遮断
- PMTは波長変換プレート<sup>°</sup>の中央に設置
- 壁面には反射シート

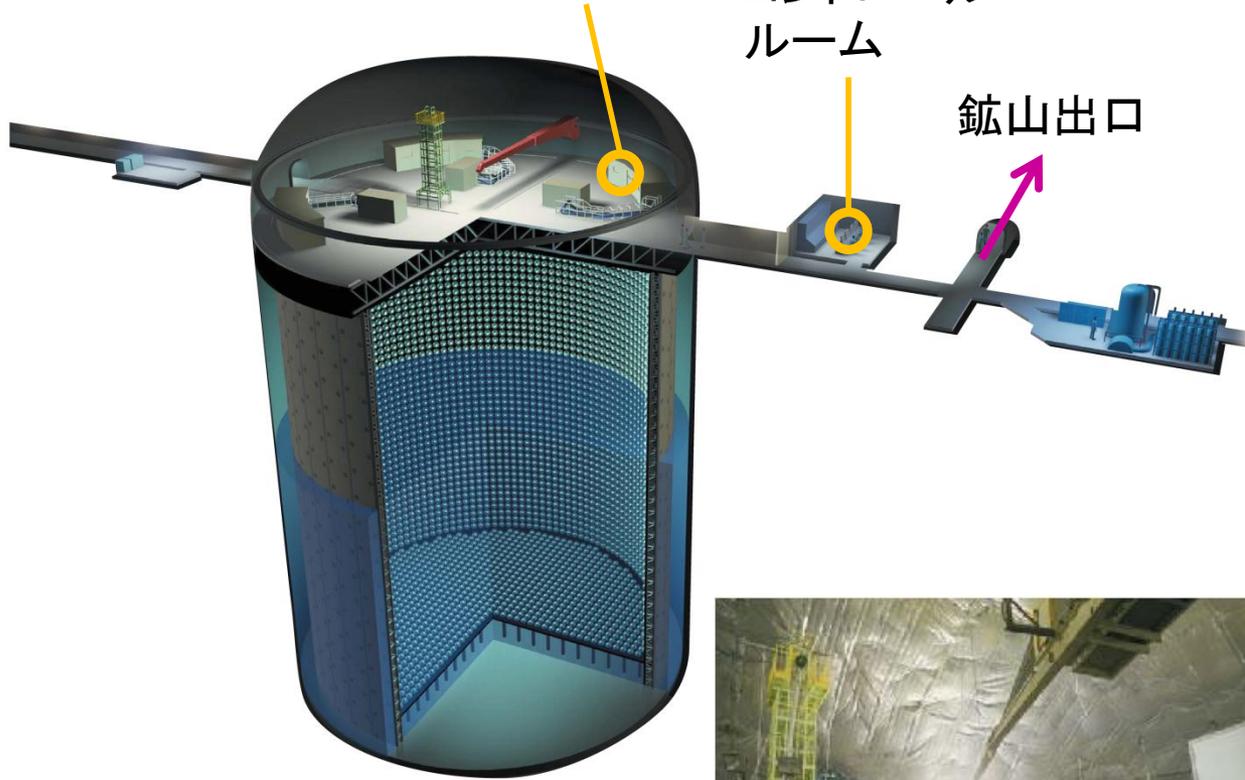


# スーパーカミオカンデ

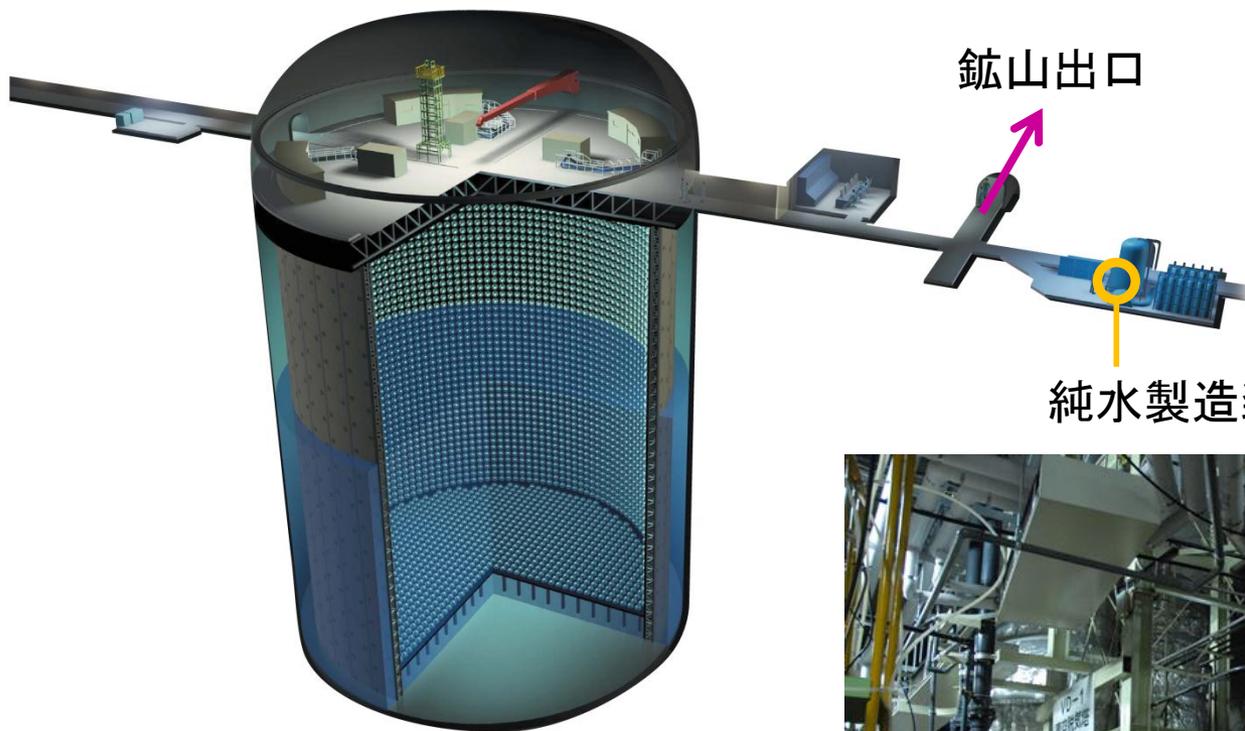
エレクトロニクスハット

コントロール  
ルーム

鉱山出口



# スーパーカミオカンデ



- 流量 60 [t/h]
- 1cc当り、 $10^{-7}$  [m]以上のごみが100個以下
- ラドン濃度  $10^{-3}$  [Bq/m<sup>3</sup>]
- 光の減衰長 80~90 [m]



# スーパーカミオカンデ

1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

4月	SK-I				6月	11/12	12月	SK-II	11月
----	------	--	--	--	----	-------	-----	-------	-----

運用開始

11,146 PMTs, 被覆率~40%  
1489.2 days, 91.7 kt·yr

事故によりPMTの  
約半数を失う

部分復旧

5,182 PMTs, 被覆率~19%  
798.6 days, 49.2 kt·yr

2006	2007	2008	2009	2010
------	------	------	------	------

7月	SK-III	8月	9月	SK-IV ~
----	--------	----	----	---------

完全復旧

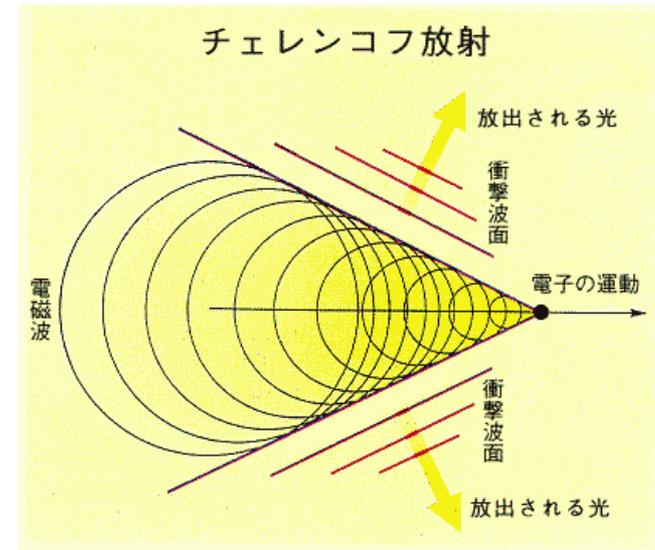
11,129 PMTs

新電子回路  
の導入

11,129 PMTs

# チェレンコフ放射

物質中での粒子の速度がその物質中の光速度を超えた時に出す放射光



- 放射光の進む距離

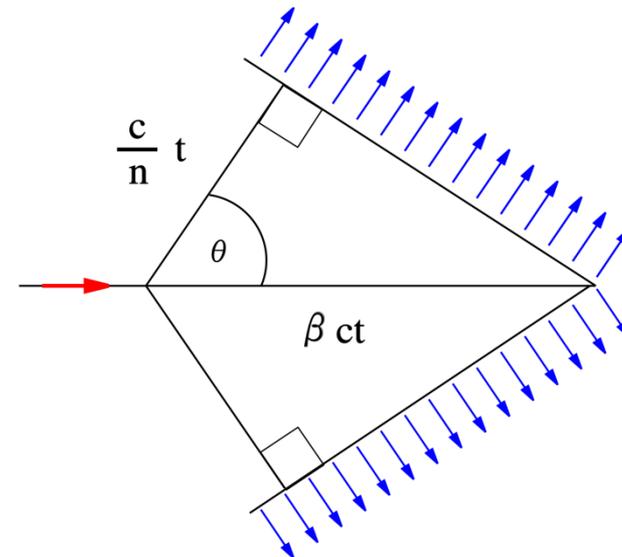
$$x_{em} = v_{em}t = \frac{c}{n}t$$

- 粒子の進む距離

$$x_p = v_p t = \beta ct$$

- 放射角

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$$



# チェレンコフ放射

## エネルギー閾値

$$E_{thr} = \frac{nm}{\sqrt{n^2 - 1}}$$

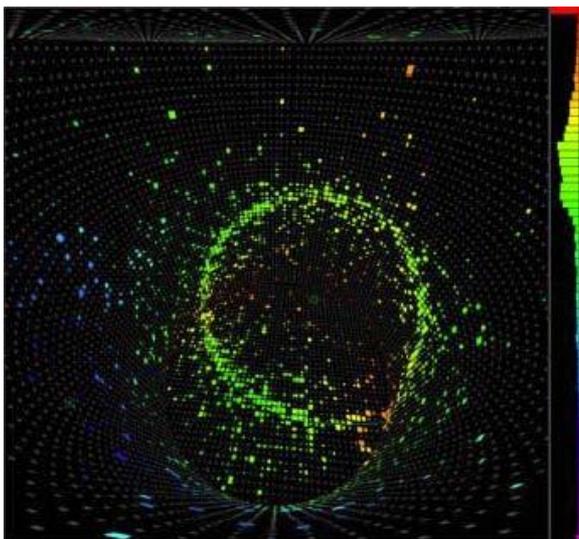
m: 荷電粒子の質量、n: 媒質の屈折率

粒子	エネルギー閾値 [MeV]
$e^{\pm}$	0.775
$\mu^{\pm}$	160.3
$\pi^{\pm}$	211.7

(水:n ≐ 1.33 @SK)

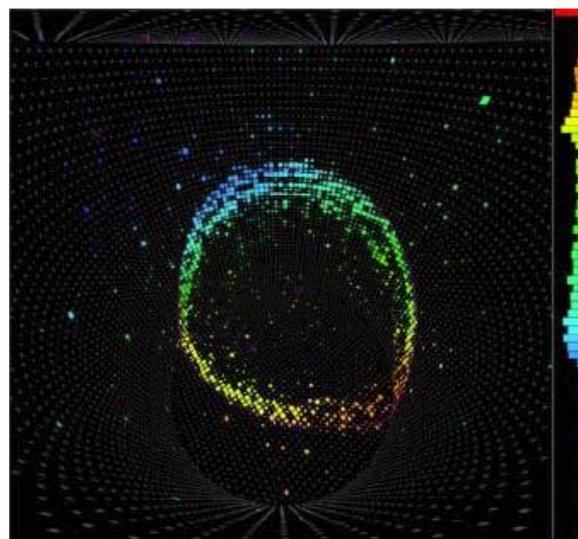
## チェレンコフリング

e-like



シャワーなどの効果でぼやける

$\mu$ -like



シャープな形のリングになる

# SK-IとSK-II

	SK-I	SK-II
PMTの数(被覆率)	11,146個(40%)	5,182個(19%)
有効体積	22.5kt	22.5kt
露出	91.7kt・yr(1489.2日)	49.2kt・yr(798.6日)
イベント数	12,232	6,584
Vertex resolution	18.1cm	20.1cm
2ring/3ring events	39±2% / 60±2%	38±2% / 60±2%
$\mu/e$ misID	3.3%	3.4%
検出効率( $p \rightarrow e^+\pi^0$ )	44.6%	43.5%
検出効率( $p \rightarrow \mu^+\pi^0$ )	35.5%	34.7%

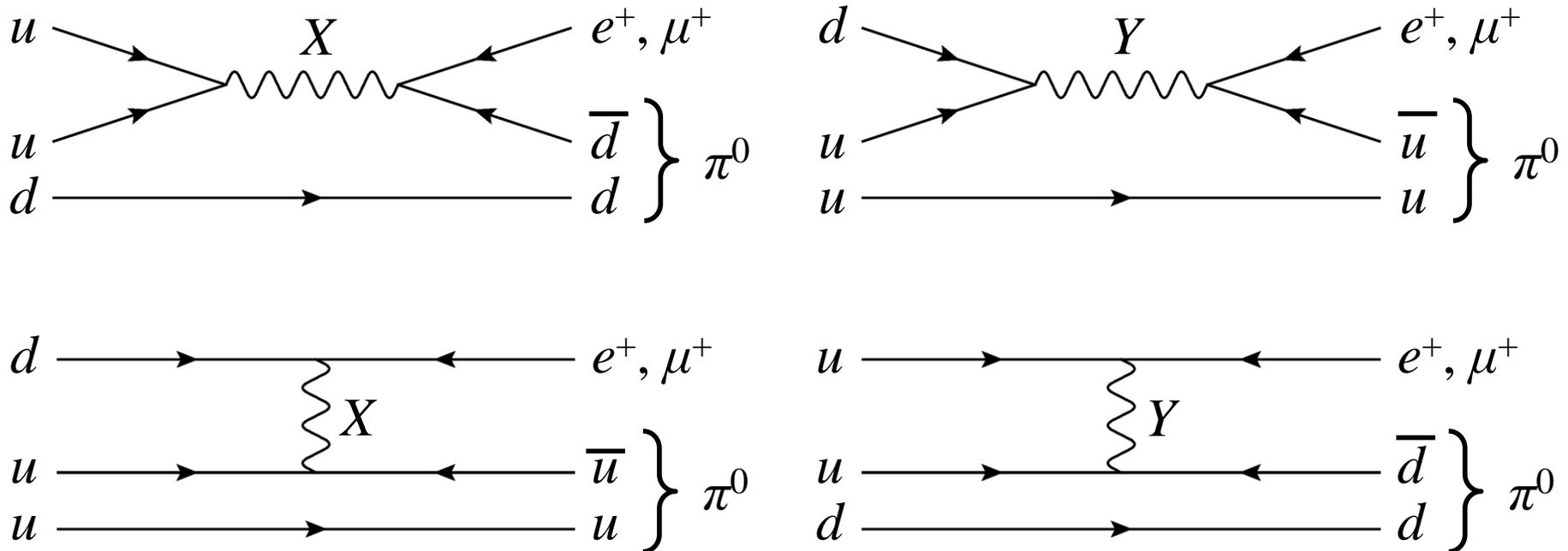
# SK-IとSK-II

	SK-I	SK-II
PMTの数(被覆率)	11,146個(40%)	5,182個(19%)
有効体積	22.5kt	22.5kt
露出	91.7kt・yr(1489.2日)	49.2kt・yr(798.6日)
イベント数	12,232	6,584
Vertex resolution	18.1cm	20.1cm
2ring/3ring events	39±2% / 60±2%	38±2% / 60±2%
$\mu/e$ misID	3.3%	3.4%
検出効率( $p \rightarrow e^+\pi^0$ )	44.6%	43.5%
検出効率( $p \rightarrow \mu^+\pi^0$ )	35.5%	34.7%

$p \rightarrow e^+\pi^0$ での見積り

# 陽子崩壊事象

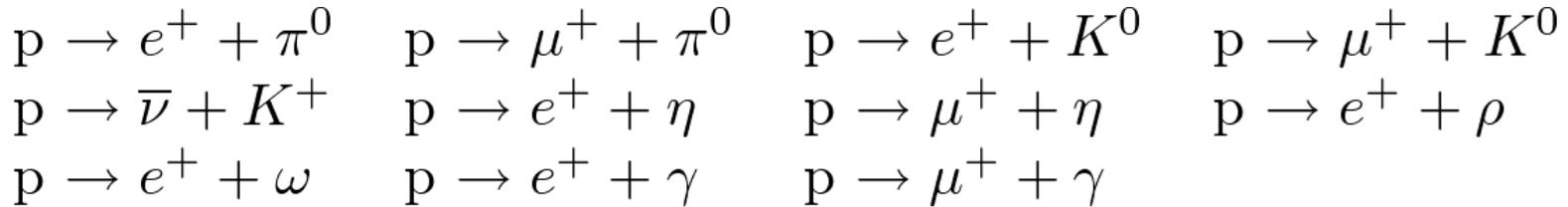
大統一理論の多くは  $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 、 $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$  の過程での陽子の崩壊を予言。



$X, Y$  はそれぞれ  $4/3, -1/3$  の電荷をもつ超重ゲージボソン。  
バリオン数、レプトン数を変化させる相互作用を及ぼす。

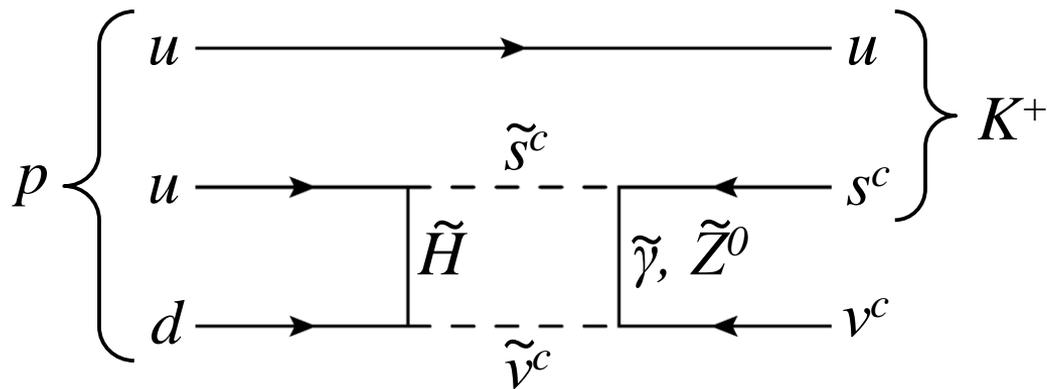
# 陽子崩壊事象

参考) 予言される陽子の崩壊には様々なモードがある。



SUSY GUTs modelでは $p \rightarrow \bar{\nu}K^+$ が支配的。

SK-IとSK-IIでのこのモードの部分寿命の下限値は $2.8 \times 10^{33}$ 年。



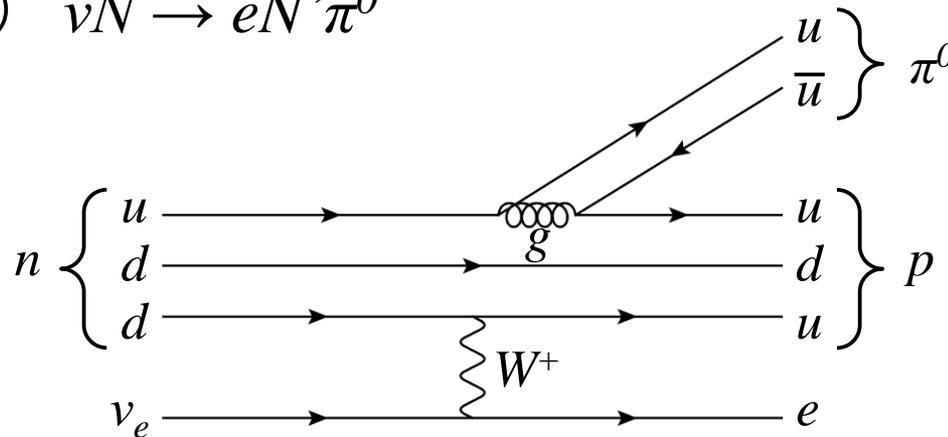
# 背景事象

主なバックグラウンドは大気ニュートリノと核子の反応。

Charged current  $\nu N \rightarrow l N' \pi^0$

Neutral current  $\nu N \rightarrow \nu N' \pi(\pi' s)$

例)  $\nu N \rightarrow e N' \pi^0$



バックグラウンドの99%以上が $\nu$ によるイベント

# モンテカルロ

効率よくバックグラウンドを落とすためにモンテカルロを使う。

## 陽子崩壊事象(シグナルイベント)

- 水素原子中の陽子 → 自由粒子とみなせる。単純な2体崩壊。
- 酸素原子中の陽子 → 束縛状態にあり、単純な崩壊ではない。
  - Fermi motion(原子核中の核子の運動)
  - 束縛エネルギーによる陽子質量の変化
$$M'_p = M_p - E_B$$
  - 強い相互作用による $\pi$ の散乱、電荷交換、吸収などの効果

これらの効果を考慮してイベントを生成する。

核子や $\pi$ の相互作用のシミュレーションにはCALORを使用。

# モンテカルロ

## 大気ニュートリノ(バックグラウンド)

大気ニュートリノのフラックスとNEUTというソフトを使用。

⇒イベント選定(後述)後のイベント数(SK-I + SK-II)

$$p \rightarrow e^+\pi^0 : 0.30 \pm 0.04(\text{MC stat.}) \pm 0.11(\text{sys.})$$

$$p \rightarrow \mu^+\pi^0 : 0.34 \pm 0.05(\text{MC stat.}) \pm 0.12(\text{sys.})$$

K2KのデータとNUANCEというソフトによるクロスチェックでも問題はなかった。



生成された陽子崩壊、大気ニュートリノのイベントはGEANT-3を使って検出器のデータに変換される。

# エネルギー、運動量の再構成

チェレンコフリングの光量と到達時刻から以下のことが分かる。

- 粒子のエネルギー
- 粒子の方向
- 粒子の種類(PID)

イベントの選定では、粒子の種類と以下のパラメータを用いる。

$$P_{\text{tot}} = \left| \sum_i^{\text{all rings}} \vec{p}_i \right| \quad \rightarrow \quad \text{陽子の運動量}$$

Resolution SK-I : 30.5 MeV/c  
SK-II : 36.6 MeV/c

$$E_{\text{tot}} = \sum_i^{\text{all rings}} \sqrt{|\vec{p}_i|^2 + m_i^2} \quad \rightarrow \quad \text{陽子のエネルギー}$$
$$M_{\text{tot}} = \sqrt{E_{\text{tot}}^2 - P_{\text{tot}}^2} \quad \rightarrow \quad \text{陽子の不変質量}$$

Resolution SK-I : 28.7 MeV/c<sup>2</sup>  
SK-II : 38.4 MeV/c<sup>2</sup>

# 陽子崩壊事象の選定

- A) チェレンコフ光のリングが2個か3個
- B) リングのひとつが $e$ -like( $\mu$ -like)で、その他のリングは $e$ -like
- C) 3リングのイベントでは $\pi^0$ の不変質量が  $85\sim 185 \text{ MeV}/c^2$
- D)  $\mu$ 崩壊起源の $e$ が $p \rightarrow e^+\pi^0$ で0個、 $p \rightarrow \mu^+\pi^0$ で1個
- E) 再構成された全運動量 $P_{\text{tot}}$ が $250 \text{ MeV}/c$ 以下で、全不変質量 $M_{\text{tot}}$ が $800\sim 1050 \text{ MeV}/c^2$

Criteria	$p \rightarrow e^+\pi^0$	$p \rightarrow \mu^+\pi^0$	Efficiency(%)	
	data (atm.MC)	data (atm.MC)	( $e^+\pi^0$ )	( $\mu^+\pi^0$ )
in fiducial	18816 (19269)	18816 (19269)	98.6	98.8
(A)	4889 (5124)	4889 (5124)	73.1	73.6
(B)	3036 (3141)	1536 (1604)	64.7	61.4
(C)	2541 (2613)	1281 (1284)	62.6	59.7
(D)	1859 (1941)	642 (580)	61.8	46.3
(E)	0 (0.3)	0 (0.3)	44.2	35.3

SK-I(91.7kt·yr)と  
SK-II(49.2kt·yr)を  
合わせた検出効率

# 陽子崩壊事象の選定

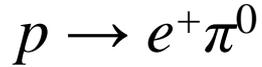
- A) チェレンコフ光のリングが2個か3個
- B) リングのひとつが $e$ -like( $\mu$ -like)で、その他のリングは $e$ -like
- C) 3リングのイベントでは $\pi^0$ の不変質量が  $85\sim 185 \text{ MeV}/c^2$
- D)  $\mu$ 崩壊起源の $e$ が $p \rightarrow e^+\pi^0$ で0個、 $p \rightarrow \mu^+\pi^0$ で1個
- E) 再構成された全運動量 $P_{\text{tot}}$ が $250 \text{ MeV}/c$ 以下で、全不変質量 $M_{\text{tot}}$ が $800\sim 1050 \text{ MeV}/c^2$

Criteria	$p \rightarrow e^+\pi^0$	$p \rightarrow \mu^+\pi^0$	Efficiency(%)	
	data (atm.MC)	data (atm.MC)	( $e^+\pi^0$ )	( $\mu^+\pi^0$ )
in fiducial	18816 (19269)	18816 (19269)	98.6	98.8
(A)	4889 (5124)	4889 (5124)	73.1	73.6
(B)	3036 (3141)	1536 (1604)	64.7	61.4
(C)	2541 (2613)	1281 (1284)	62.6	59.7
(D)	1859 (1941)	642 (580)	61.8	46.3
(E)	0 (0.3)	0 (0.3)	44.2	35.3

SK-I(91.7kt·yr)と  
SK-II(49.2kt·yr)を  
合わせた検出効率

$\mu$ 崩壊起源 $e$ の  
検出効率 $\sim 80\%$

# 結果



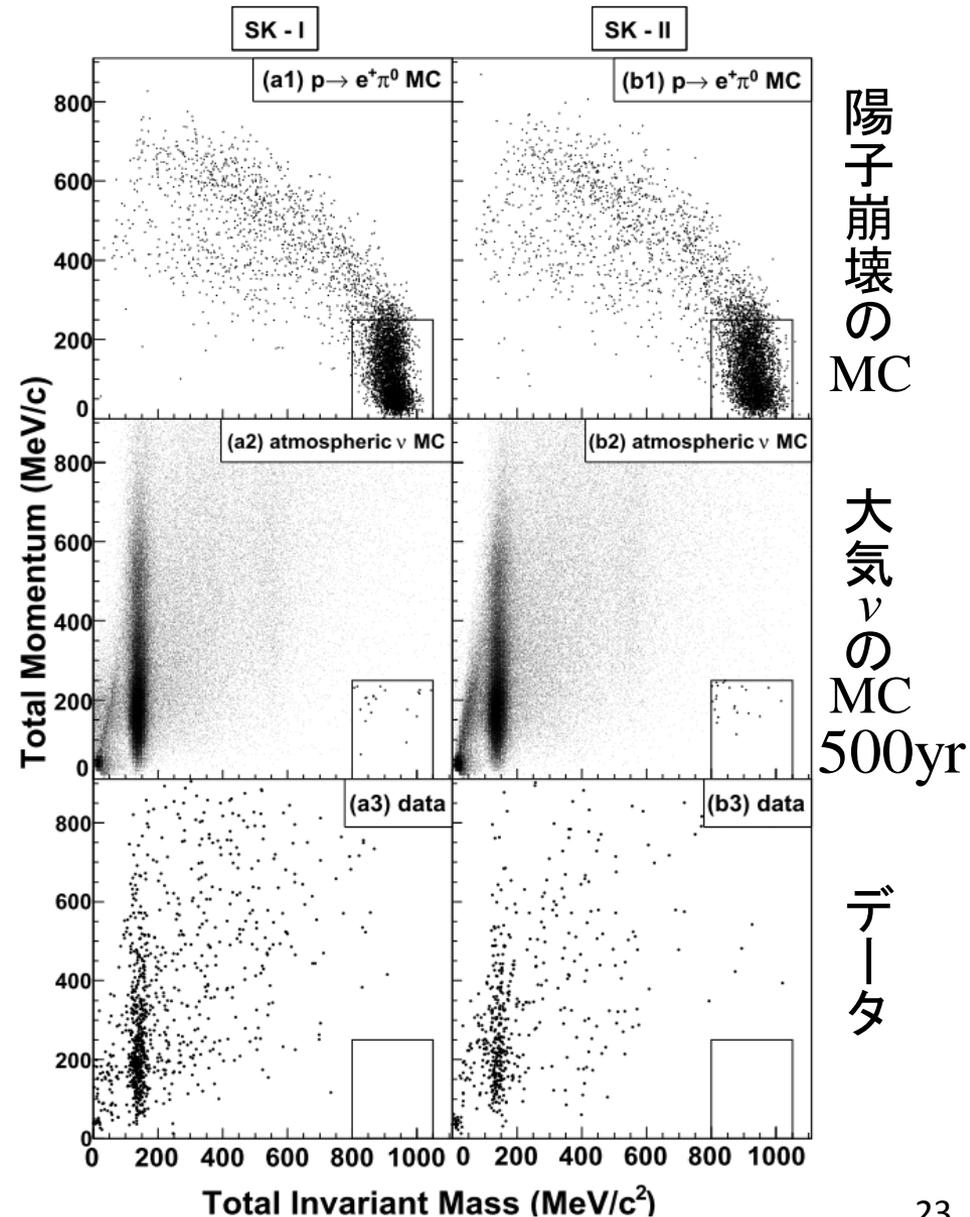
右図はA~Dの選定後の  
 $P_{\text{tot}}$  vs  $M_{\text{tot}}$ のプロット。  
右下のBoxはEの選定の領域。

このモードでの陽子崩壊事象は  
発見できず。  
部分寿命の下限値が得られた。

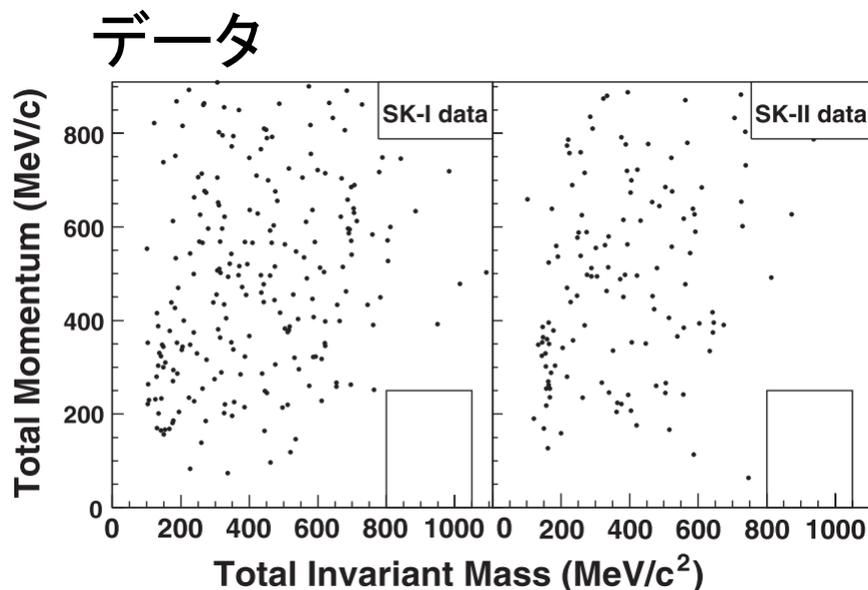
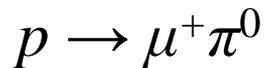
$$\begin{aligned} \tau / B_{p \rightarrow e^+ \pi^0} \\ > 8.2 \times 10^{33} \text{ [yr]} \text{ (90\% C.L.)} \end{aligned}$$

以前(1998, @SK)の値は

$$\begin{aligned} \tau / B_{p \rightarrow e^+ \pi^0} \\ > 1.6 \times 10^{33} \text{ [yr]} \text{ (90\% C.L.)} \end{aligned}$$



# 結果



このモードでも陽子崩壊事象は発見できず。  
部分寿命の下限値は

$$\tau / B_{p \rightarrow \mu^+ \pi^0} > 6.6 \times 10^{33} \text{ [yr]} \text{ (90\% C.L.)}$$

以前(1999, @IMB-3)の値は

$$\tau / B_{p \rightarrow \mu^+ \pi^0} > 4.7 \times 10^{32} \text{ [yr]} \text{ (90\% C.L.)}$$

# まとめ

- $p \rightarrow e^+\pi^0$ 、 $p \rightarrow \mu^+\pi^0$ での陽子崩壊事象は検出できなかった。
- 陽子崩壊の部分寿命の下限值は $p \rightarrow e^+\pi^0$ が  $8.2 \times 10^{33}$ 年、 $p \rightarrow \mu^+\pi^0$ が  $6.6 \times 10^{33}$ 年 (90% C.L.)。
- $p \rightarrow \bar{\nu}K^+$ などの測定結果と合わせて、大統一理論のうちminimal SU(5), minimal SUSY SU(5)などのいくつかの理論が否定された。
- SUSY SO(10)が有力。