

# 大型水チェレンコフ検出器

東京大学宇宙線研究所  
神岡宇宙素粒子研究施設  
塩澤 真人

Thanks to Super-K collaboration  
T2K collaboration  
NND (Neutrino & Nucleon  
decay Detector) group

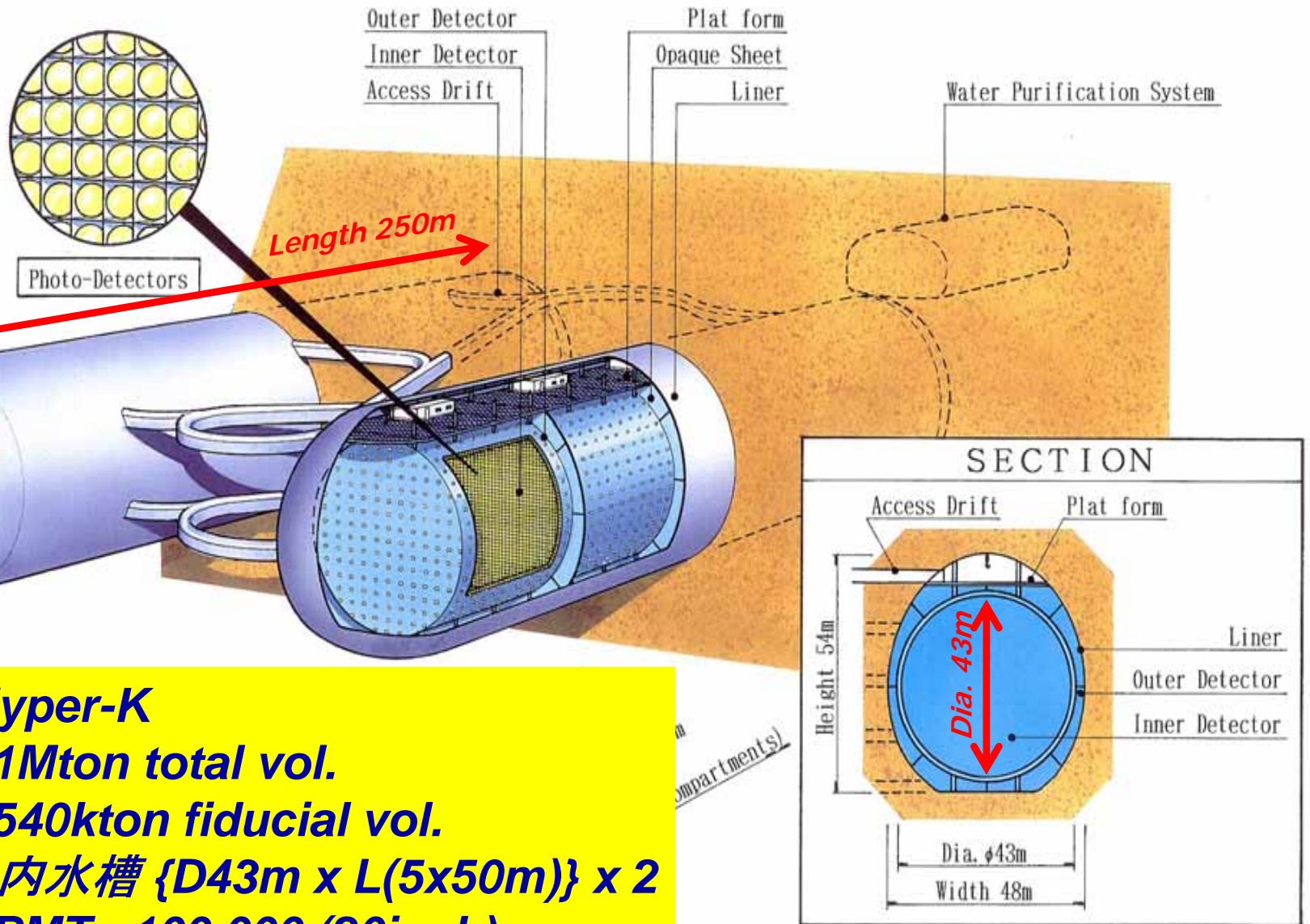
- 研究目的(レプトンCP測定と陽子崩壊)
- 検出器のR&D(日本と少し海外)
- まとめ

# ハイパーカミオカンデ

リングイメージング水チェレンコフ検出器



**Super-K**  
50kton total  
22kton fiducial



## Hyper-K

1Mton total vol.

540kton fiducial vol.

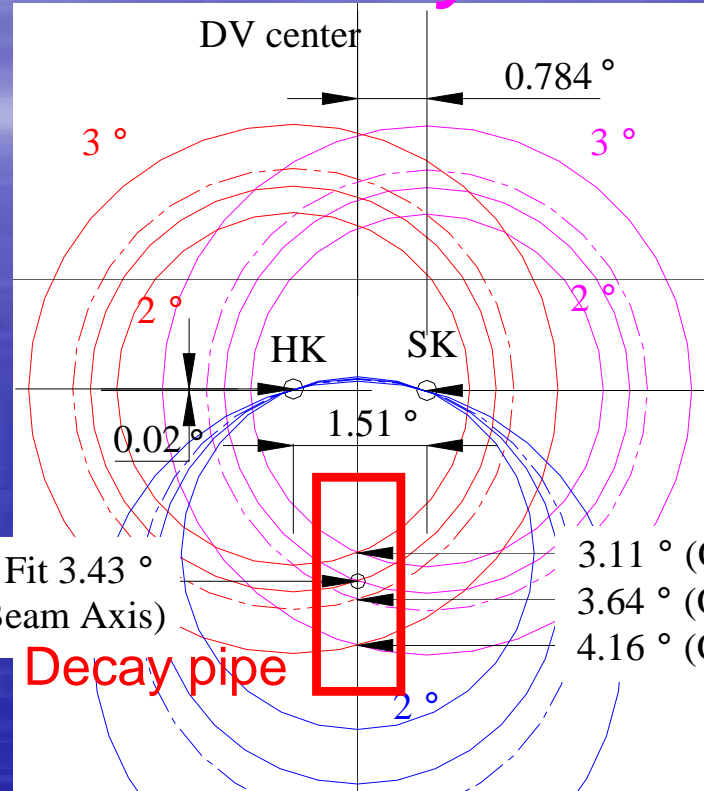
内水槽 {D43m x L(5x50m)} x 2

PMT ~100,000 (20inch)

(センサーの被覆率20%)

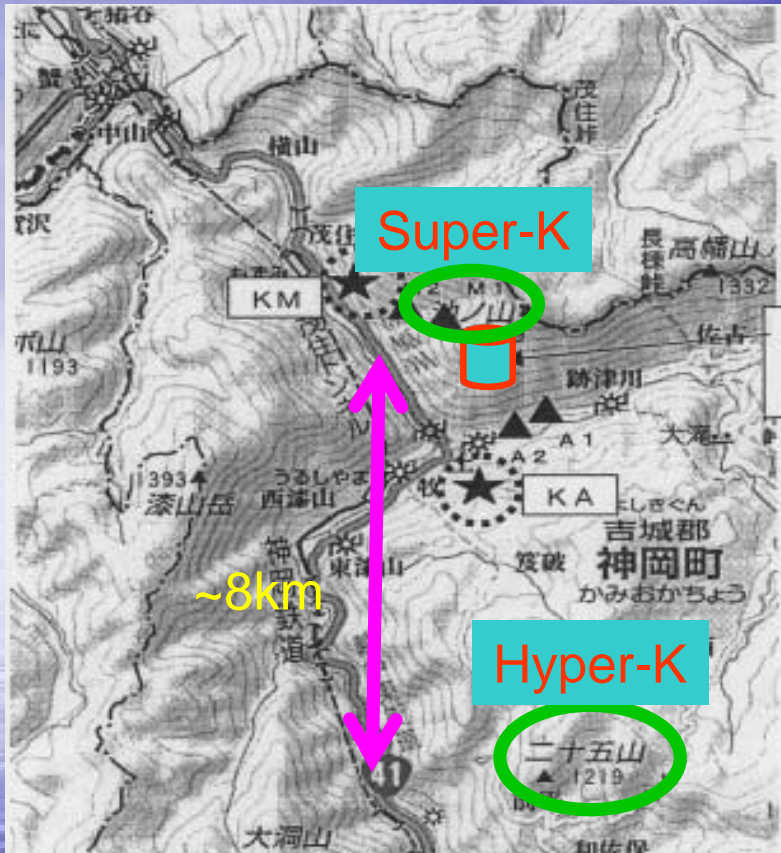
# 候補地

Beam eye



Best Fit 3.43° (OAB2.3° Beam Axis)  
 3.11° (OAB2° beam axis)  
 3.64° (OAB2.5°)  
 4.16° (OAB3°)

Decay pipe



神岡町栃洞坑

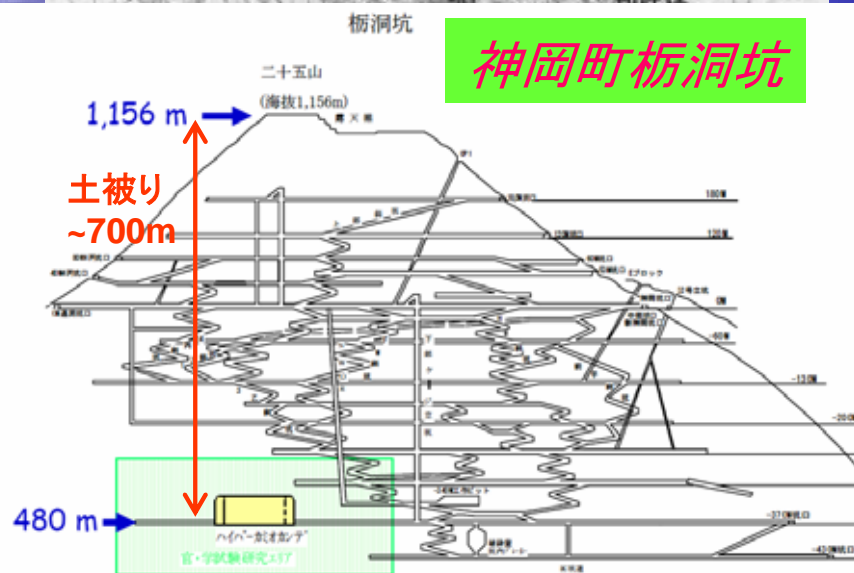


表 3.1:  $E_\nu$  at the oscillation maximum for the baseline length of 295km and corresponding off-axis angle.

$\Delta m^2$	2.04	2.18	2.75	3.17	3.28
$[10^{-3} eV^2]$	(90% A.R.)	(80% A.R.)	(best fit)	(80% A.R.)	(90% A.R.)
$E_\nu [GeV]$	0.487	0.520	0.656	0.756	0.782
OA angle [deg.]	3.1	3.0	2.4	2.1	2.0

# CP sensitivity

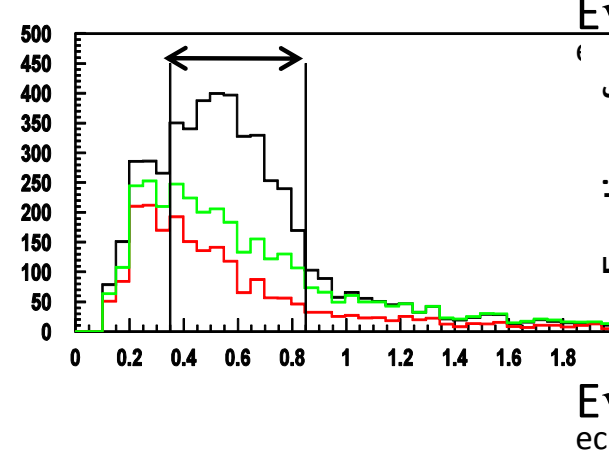
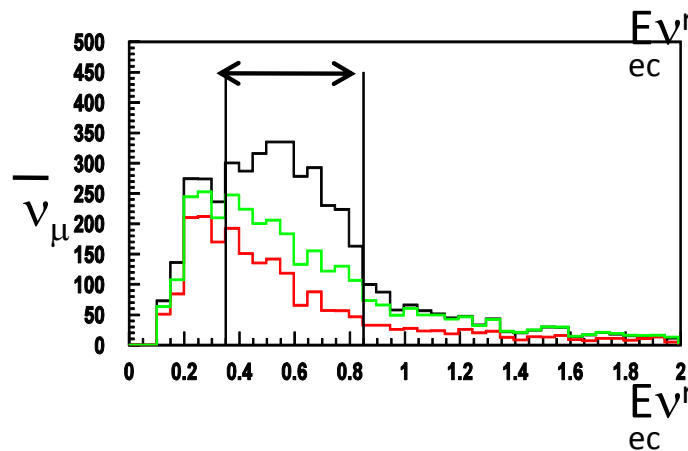
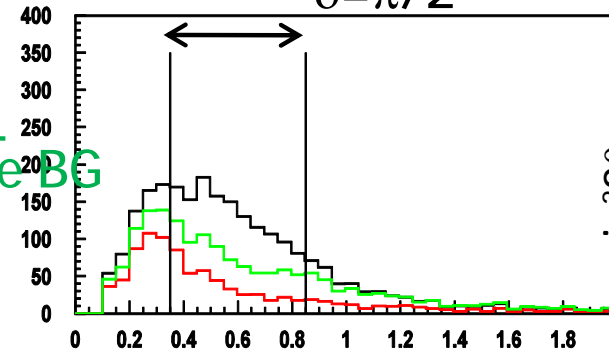
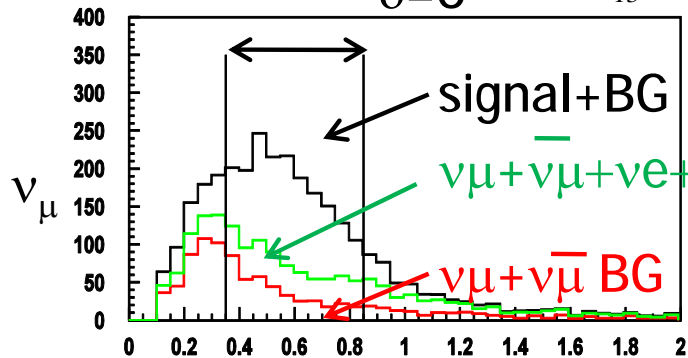
- Cover 1<sup>st</sup> Maximum Only
- 2.2 Years Neutrino + 7.8 Years anti-Neutrino Run 1.66 MW
- 540 kt Water Cherenkov Detector

Kamioka

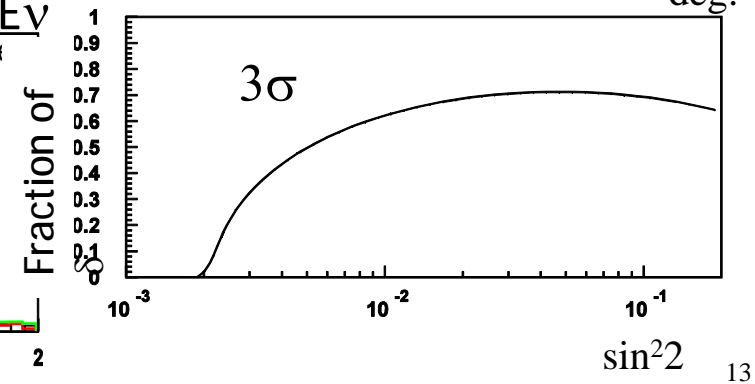
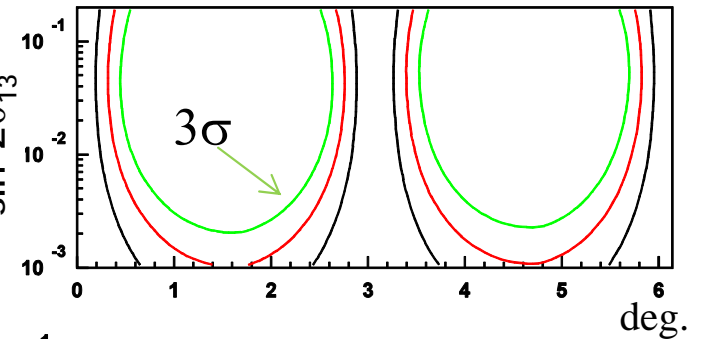
Tokai

295 km  
2.5 deg. Off-axis  
 $\langle E \nu \rangle \sim 0.6 \text{ GeV}$

$\delta = 0$   $\sin^2 \theta_{13} = 0.03$ , Normal Hierarchy  $\delta = \pi/2$



CP sensitivity



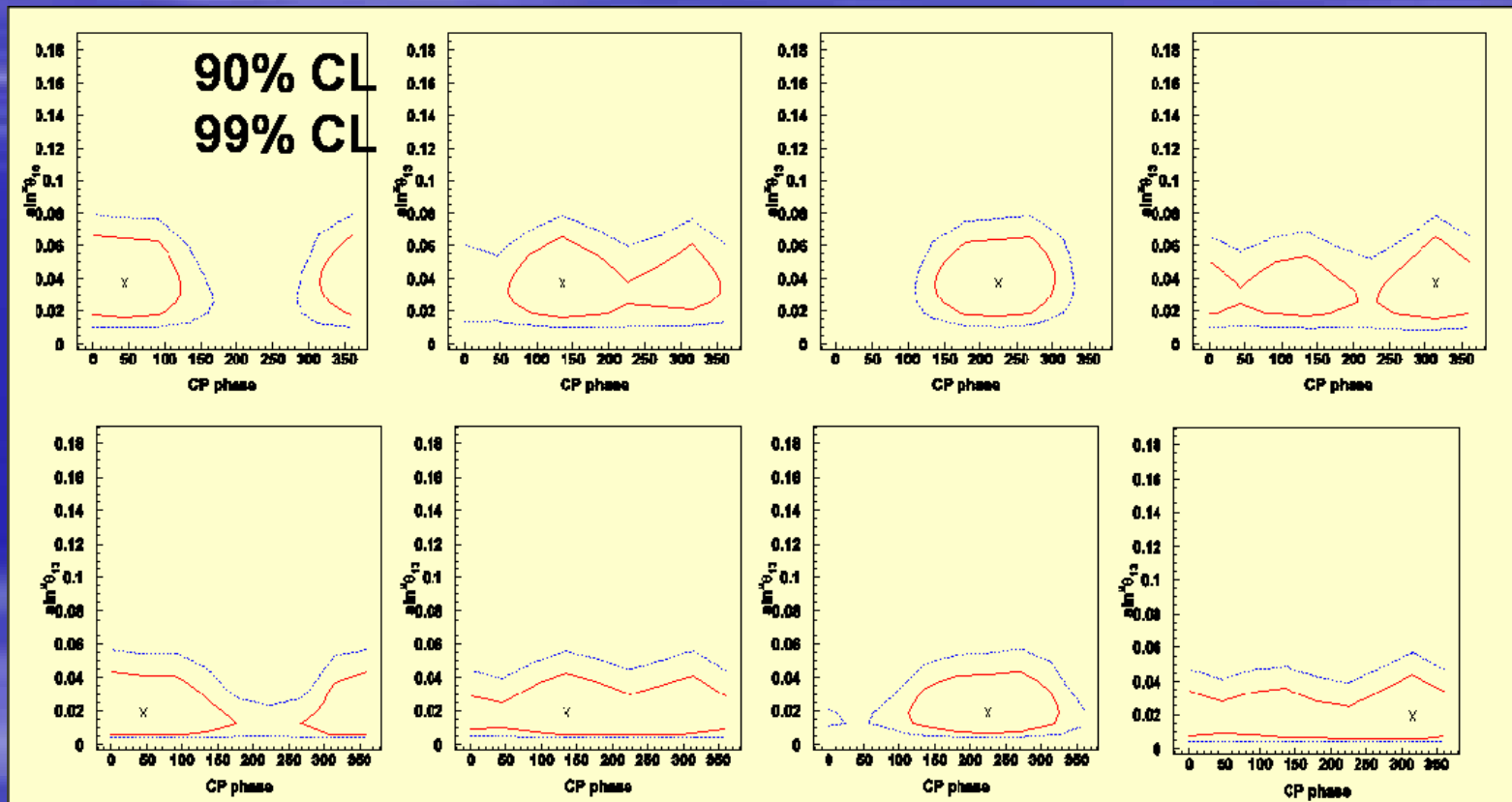
# 大気ニュートリノによる $\delta_{CP}$ sensitivity



4yrs Hyper-K

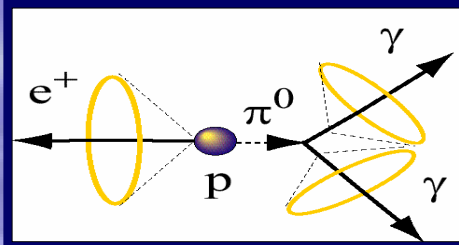
$s^2\theta_{12}=0.825$   
 $s^2\theta_{23}=0.5$   
 $s^2\theta_{13}=0.00\sim 0.04$   
 $\delta_{cp}=0^\circ\sim 360^\circ$   
 $\Delta m^2_{12}=8.3e-5$   
 $\Delta m^2_{23}=2.5e-3$

$\sin^2\theta_{13}$   
 $\uparrow$   
 $\rightarrow$   
 CP phase

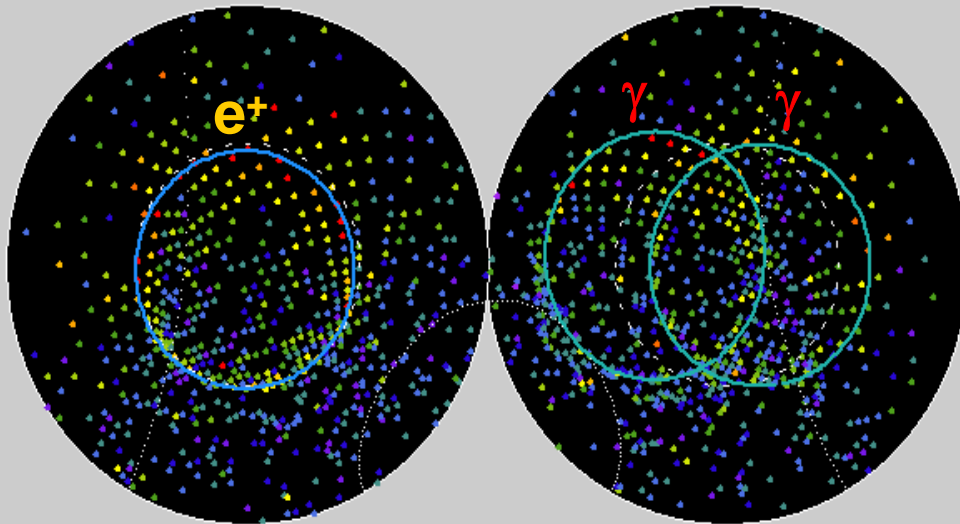


大気ニュートリノでも、 $\theta_{13}$ ,  $\delta$ の値によっては、感度がある。  
 (他にも質量階層性、 $\theta_{23}$  octant)  
 $\leftrightarrow$  加速器ニュートリノと大気ニュートリノ研究を相補的に進める。

# 陽子崩壊 $p \rightarrow e^+ \pi^0$ channel の探索



Charge(pe)  
 • >15.0  
 • 13.1-15.0  
 • 11.4-13.1  
 • 9.8-11.4  
 • 8.2- 9.8  
 • 6.9- 8.2  
 • 5.6- 6.9  
 • 4.5- 5.6  
 • 3.5- 4.5  
 • 2.6- 3.5  
 • 1.9- 2.6  
 • 1.2- 1.9  
 • 0.8- 1.2  
 • 0.4- 0.8  
 • 0.1- 0.4  
 • < 0.1



SK-II (half PMT) forward-backward display for  $p \rightarrow e^+ \pi^0$

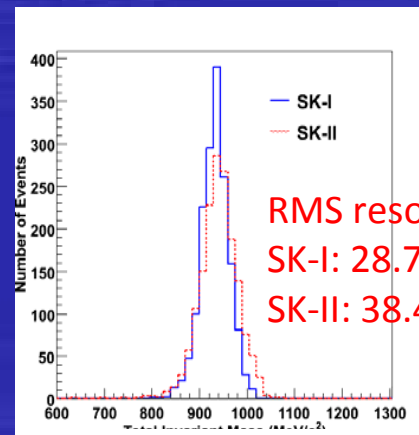
## Selection Criteria

- 2 or 3 Cherenkov rings
- All rings are showering
- $85 < M_{\pi^0} < 185 \text{ MeV}/c^2$  (3-ring)
- No decay electron
- $800 < M_{\text{proton}} < 1050 \text{ MeV}/c^2$   
 $P_{\text{total}} < 250 \text{ MeV}/c$

\*for Next Generation, tighter cut  $P_{\text{total}} < 100 \text{ MeV}/c$  may be applied

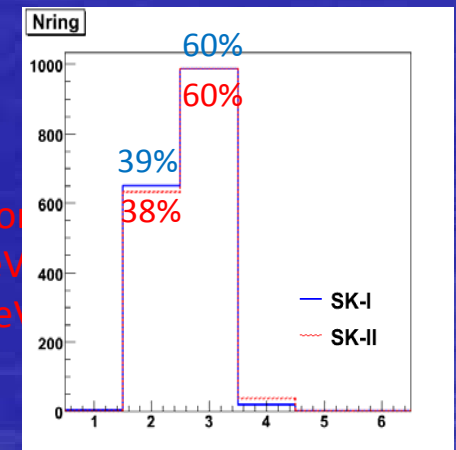
✓ PMT半分(被覆率20%)での測定精度  
 → Super-K phase-II dataにより、確認済(PRL 102:141801, 2009)

✓ 大気ν BG頻度  
 → K2K ν beamにより確認済  
 (PRD77:032003, 2008)



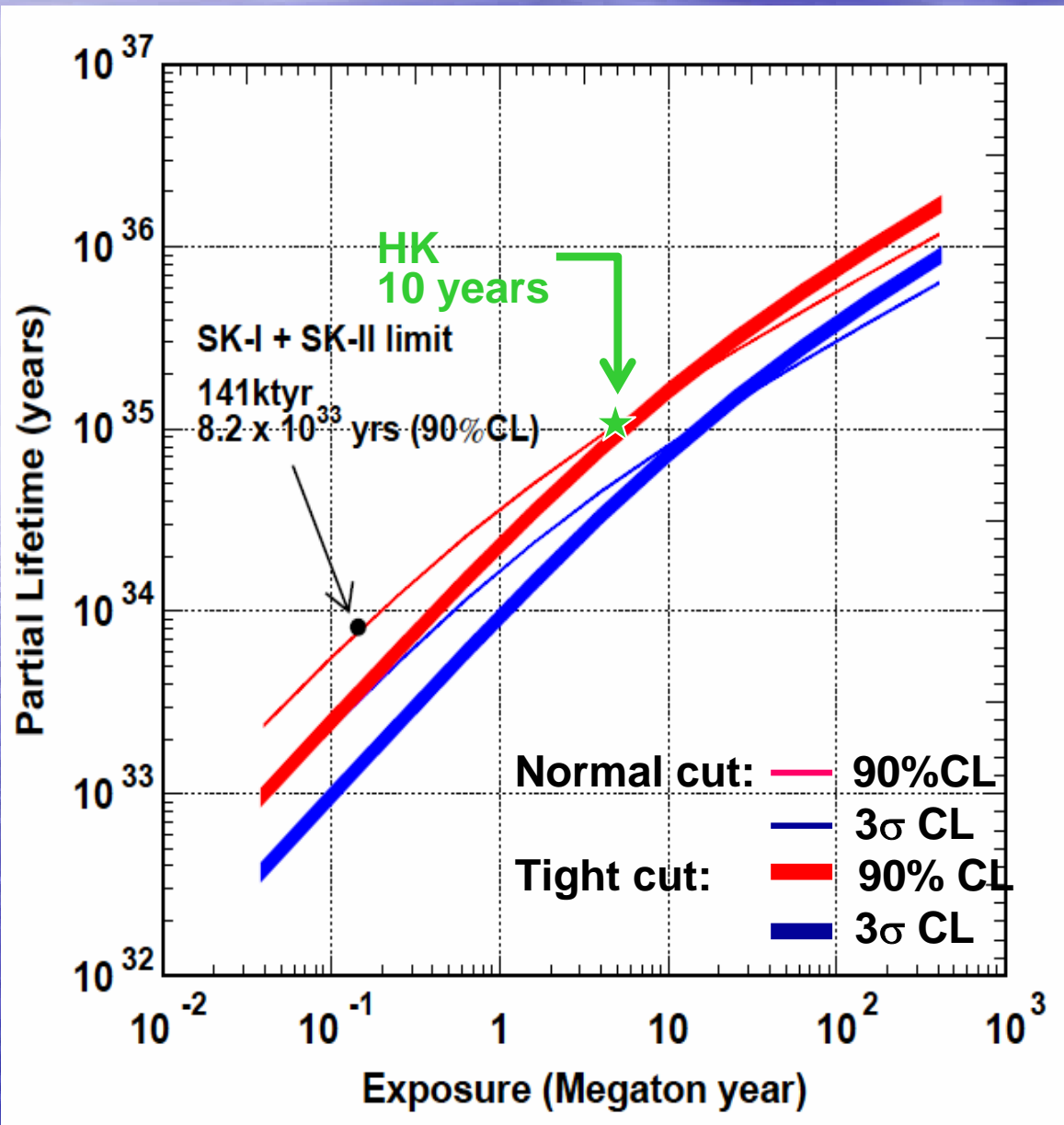
Proton Mass

RMS resolution  
 SK-I: 28.7 MeV  
 SK-II: 38.4 MeV



Number of rings

# $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 期待される感度



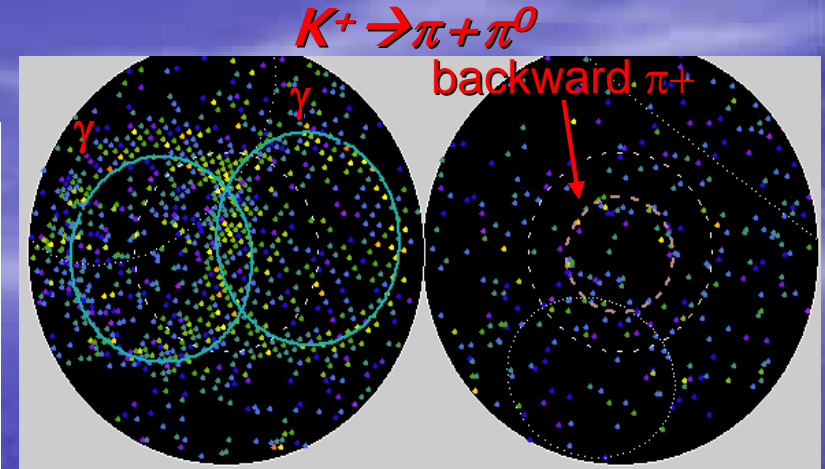
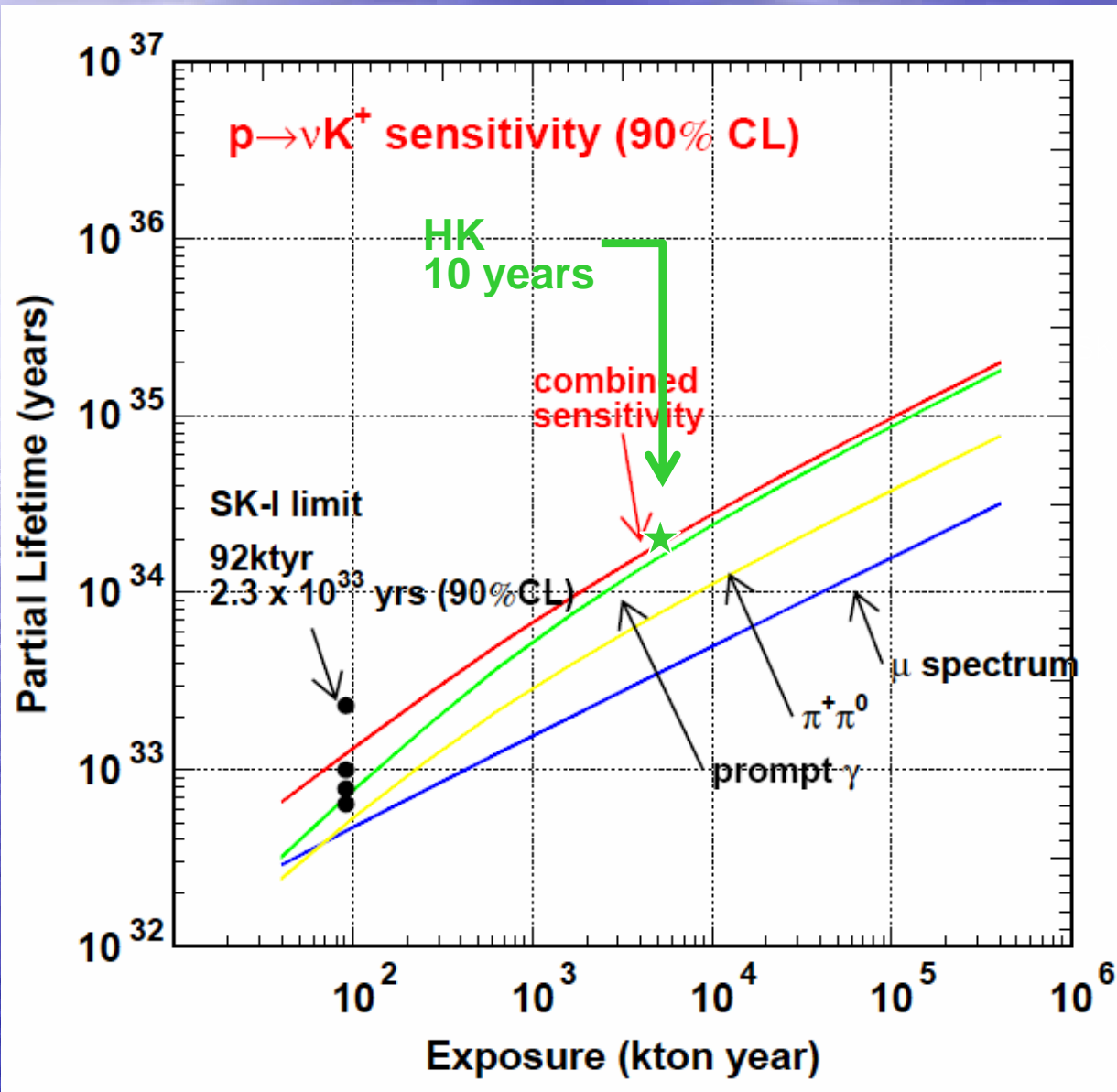
- $P_{tot} < 250 \text{ MeV/c}$  (SK cut)  
BG=2.2 ev/Mtonyrs, eff.=44%
- $P_{tot} < 100 \text{ MeV/c}$  (tighter cut)  
BG=0.15ev/Mtonyrs, eff.=17.4%

BGはK2K  $\nu$  beamで確認。  
PRD77:032003,2008

SK-I + SK-II  
0.14Mtyr  
→  
8.2x10<sup>33</sup> yrs @ 90% CL

HK(0.5 Mt):10years  
5.0Mtyr  
→  
~10<sup>35</sup> yrs @ 90% CL

# $p \rightarrow \nu K^+$ sensitivity



(full density) forward-backward display

SK-I + SK-II  
0.14Mtyr



$2.8 \times 10^{33}$  yrs @ 90%CL

HK(0.5 Mt):10years  
5Mtyr



$\sim 2 \times 10^{34}$  yrs @ 90% CL



# その他の物理

- 大気ニュートリノの精密観測
  - $\delta, \theta_{13}$ , 質量階層構造 ( $\sin^2\theta_{13} > \sim 0.01$ )
  - $\theta_{23} < \pi/4$  or  $\theta_{23} = \pi/4$  or  $\theta_{23} > \pi/4$
- 超新星爆発ニュートリノ
  - 爆発のメカニズムの解明
  - 質量階層性？
- 太陽ニュートリノ
  - 昼夜のフラックス差 (地球によるニュートリノ振動の測定)
  - Hepニュートリノの測定

# R&Dに関して

カミオカンデ、スーパーカミオカンデの実績  
→水チェレンコフ検出器の技術は証明済。

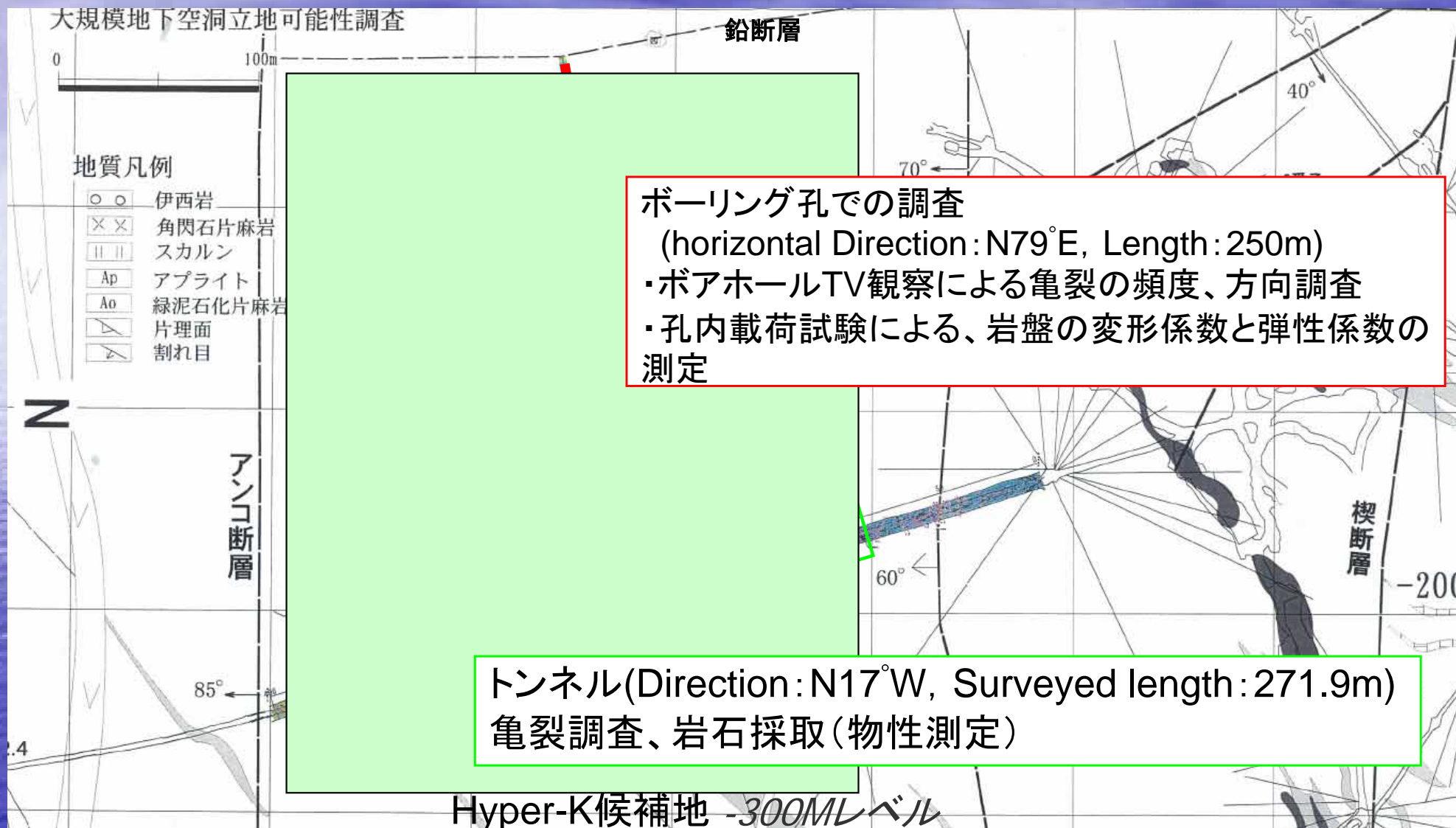
- 大型化(100万トンサイズ)により発生する困難(大空洞など)の解決が必須
- 生産性や建設時間、コストの改善、最適化が望まれる

1. 大空洞
2. 水槽、水
3. 光センサー＋エレキ
4. 物理の感度

# 概念設計をまとめる、適宜更新 3年で絞込み、+2年で完了

- 大空洞
  - サイトの評価(地質図、岩石の物性、地圧等)
  - 空洞設計(配置、形、大きさ)
  - 掘削コストの削減(掘削方法、ずり廃棄方法)
- 水槽設計
  - プラスチックライニングの実現性(コストダウン)
  - 光センサー取り付け方法
  - 透過率低下の問題がないか？
    - 水質悪化原因の理解。水槽内物質の選択。
    - 水質、水量調査、純水システム設計
- PMT+読み出しエレクトロニクス
  - Hybrid Photo Detector (光電面+シリコン検出器)
  - 大型High QE PMT
  - 最適なPMTサイズの決定(QE, 防爆ケース)
  - 読み出しエレクトロニクス設計
  - 防爆ケース(デザイン+防爆の実証試験)
- 物理感度の研究
  - T2K, 大気ニュートリノ、陽子崩壊

# 大規模地下空洞立地可能性調査





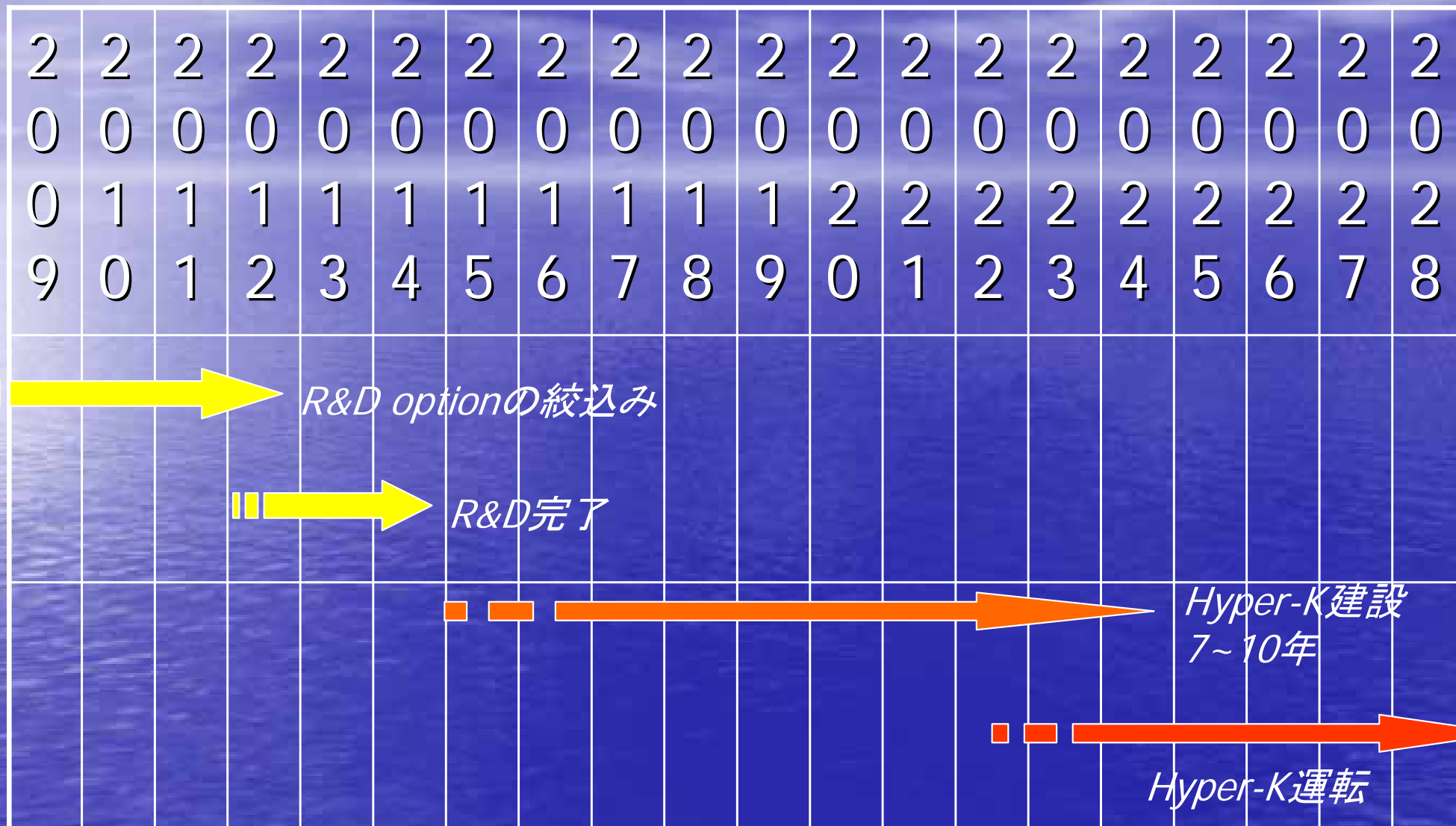
# 光センサー、エレキ

20インチPMT+防爆ケースはSuper-K  
で実証済み



- さらなる改善(コストダウン、生産性、性能UP)
  - High QEの技術開発はコストダウン、センサーの小型化を可能にする
  - 防爆ケースがなくせるか？センサーの小型化？強化？
  - エレキの概念設計
  - 他にコストダウンにつながる開発がないか？

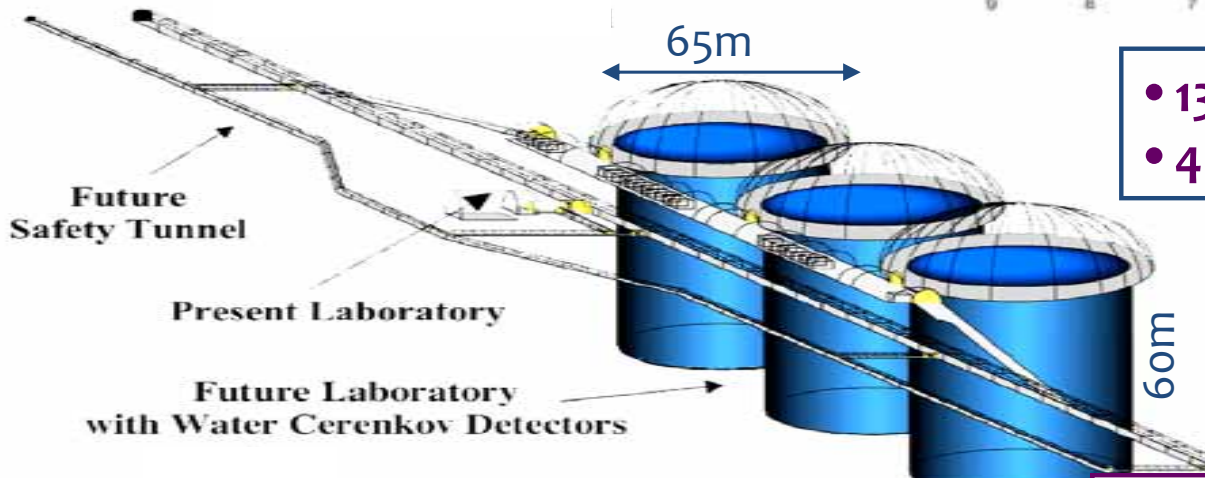
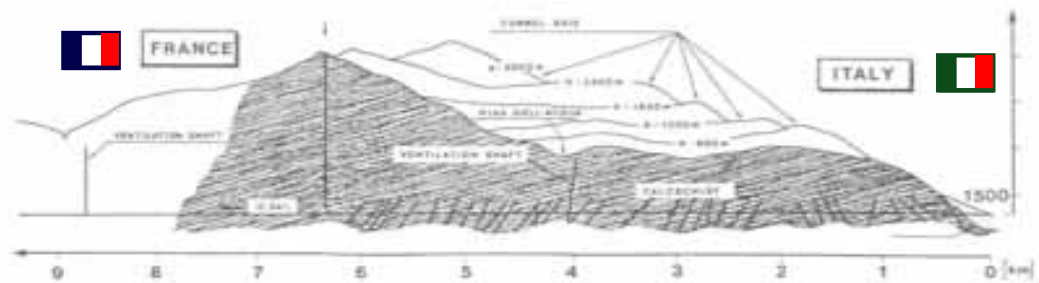
# Hyper-Kタイムテーブル



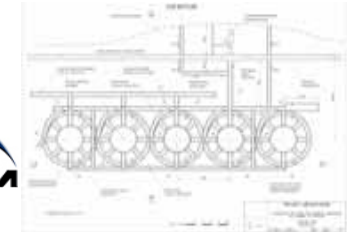
まずはconceptual designを作りあげ、R&Dの進展に応じて更新。

# Memphys

MEgaton Mass PHYSics at Frejus



- 130 Km du CERN
- 4800 m.w.e.



Acquisition regroupée:

- Water Čerenkov (“cheap and stable”)
- Masse fiduciaire totale: 440 kt
- Baseline:
  - 3 modules cylindriques 60x65 m
  - Taille limitée par la longueur d’atténuation par la pression sur les PMTs;
  - Readout: 12” PMTs, 30% geom. cover

**PHOTONIS**

• TRAVAIL AVEC PHOTONIS POUR LA RÉALISATION DES PMTs 12" ADAPTE A L'EXIGENCES DE MEMPHYS.

**Test des PMTs à la Pression: ≈ 10 bars**

Collaboration avec BNL (M. Diwan) commence à NNN07: tank de DUSEL, test IPNO

• MEMPHYS A BESOIN D'UNE ACQUISITION REGROUPE QUI RENDE L'ÉLECTRONIQUE AGILE ET RAPIDE.

**Électronique intégrée**

Photomultiplier Array Integrated in Sign Read Out Chip

Joël Putas IPN Orsay  
Journée thématique v 08  
<http://pmm2.in2p3.fr>

• Générateur HV pour 4x4 PMTs (2kV-2mA) – 1 power supply locale (48V-30W, power over Ethernet standard)

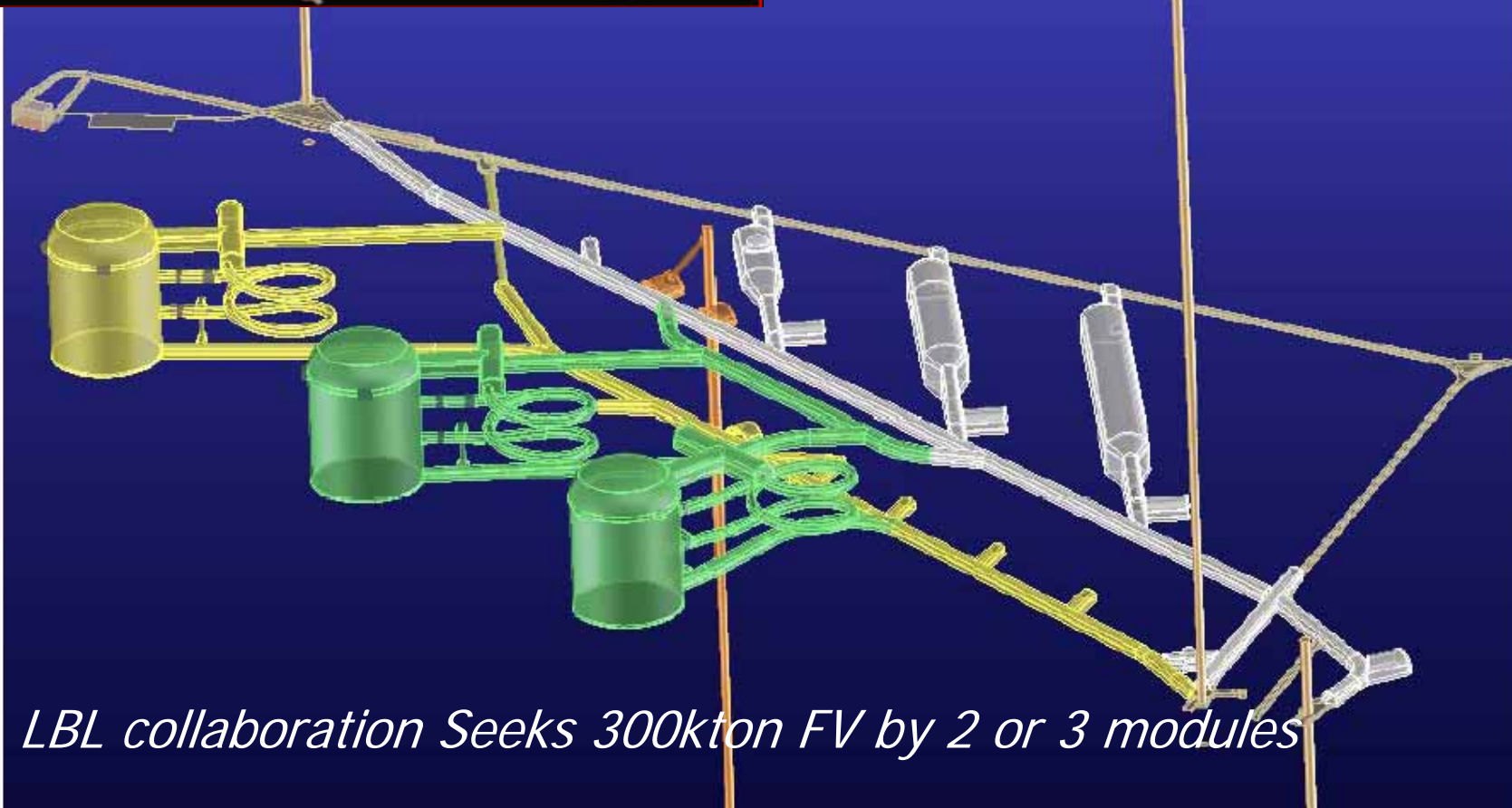
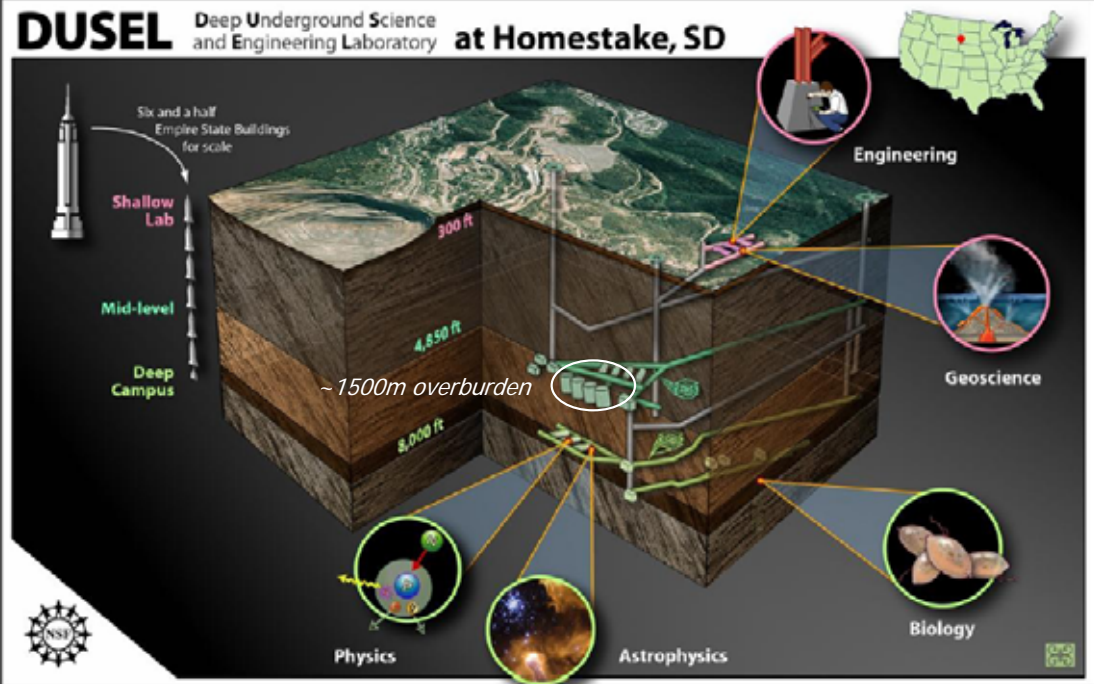
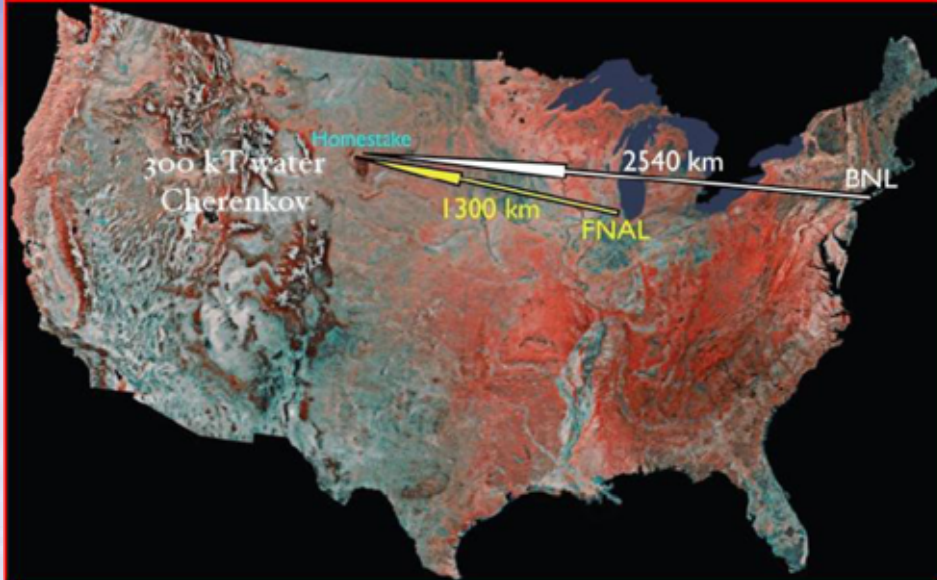
contact: J.E.Campagne  
campagne@lal.in2p3.fr

M.M. – Memphys et Memphysno – Water Čerenkov en Europe

http://www.apc.univ-paris7.fr/APC\_CS/Experiences/MEMPHYS/



# DUSEL LONG BASELINE EXPERIMENT



*LBL collaboration Seeks 300kton FV by 2 or 3 modules*

# Major Milestones (DUSEL LBL)

- Large Cavity Design Supplement **May 2009**
- Proposal to Prepare Preliminary Facility Design & Integrate the Suite of Experiments: **submitted 15 May 2009**
- NSF Solicitation to Develop Experiments (S-4) Results: **anticipated ~ July 2009**
- S-4 Work Shop in South Dakota: **1-5 Oct 2009**
- Preliminary Design Complete: **fall 2010**
- Presentation to NSB: **spring 2011**
- Construction Start: **2<sup>nd</sup> Quarter 2013**

# 大型水チェレンコフ検出器まとめ

- 確立した水チェレンコフ技術
- 豊富な研究テーマ(素粒子、宇宙)
  - ニュートリノ精密研究(加速器、大気、超新星爆発、太陽)
  - 陽子崩壊
- 検出器の設計を早急にまとめる。同時にR&Dの推進
  - 国際競争の激化(US, Europe)
  - $\theta 13$ の発見が来年にもあるかもしれない