

Hyper-Kamiokande

54m

49.5m

48m

塩澤 真人

東京大学 宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

東京大学 国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構 神岡サテライト

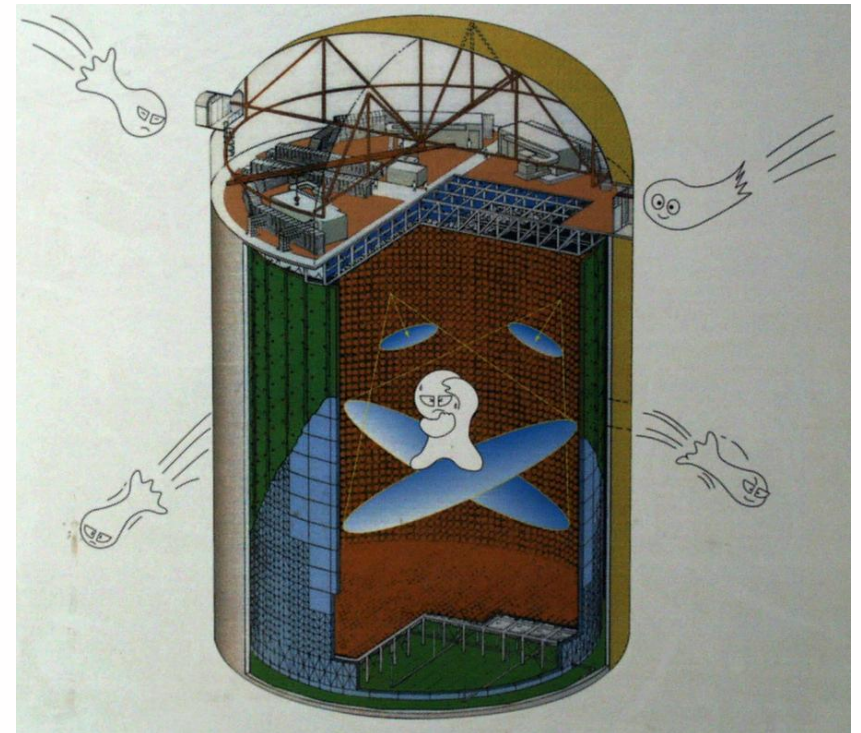
CRC Town Meeting
2014年3月14日



247.5m (2 compartments x 2 cavities)

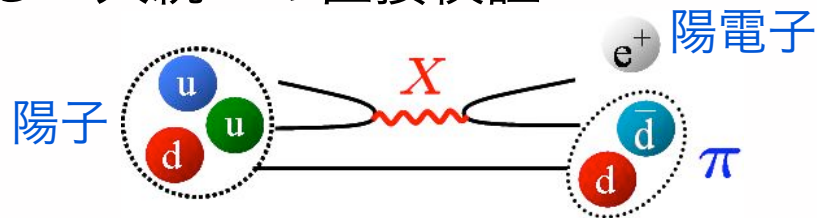
なぜニュートリノ？

- 三世代クォークの枠組み（混合角、 δ 、ユニタリティー）は確立した。一方でニュートリノは未測定量も残っている（ δ_{CP} 、質量、マヨナラ性、第4のニュートリノ？）。
- 測定済のパラメータも理解はできていない。
 - 極端に軽いニュートリノ質量。ヒッグス以外の質量生成機構？
 - 大きな世代間混合。未知の対称性が存在？
- 自然の中でのニュートリノの役割
 - 宇宙はニュートリノで満ちている
 - 地球、太陽、超新星爆発
 - ニュートリノのCP対称性の破れが物質優勢な宇宙誕生の原因？

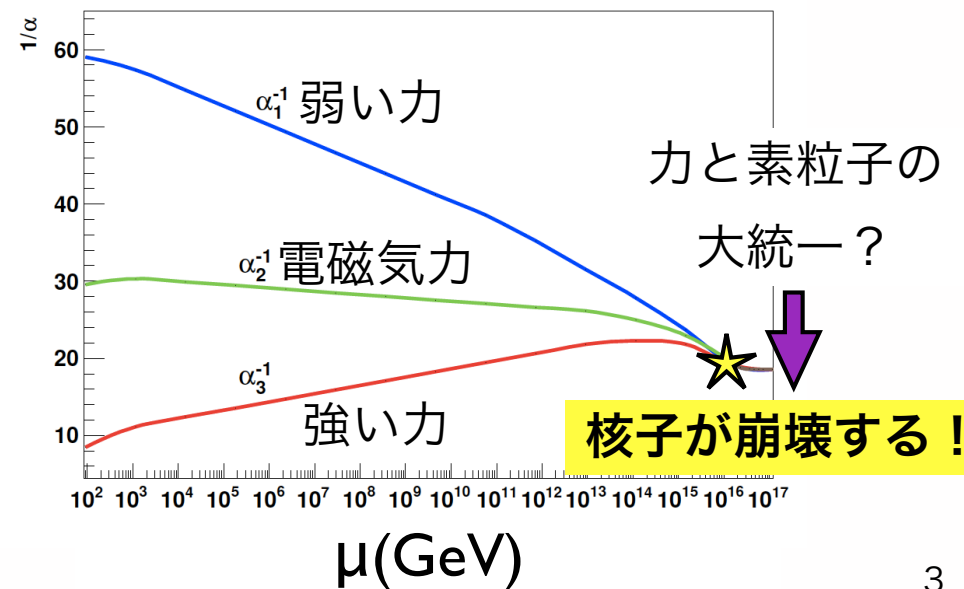


なぜ核子崩壊？

- 標準理論では理解できない根源的な問い
- なぜクォークとレプトンが必要？ なぜ3つの力？ $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ ？
- なぜ $Q_{\text{電子}} = 3 \times Q_{\text{クォーク}}$ ？
- 素粒子と力の統一（大統一）が問いに答える可能性
- 大統一の間接的証拠
 - 力の強さの $O(10^{16})\text{GeV}$ での一致
 - ニュートリノの微小質量
- 核子崩壊実験の目的
 - レプトン・クォーク間の直接遷移を見る → 大統一の直接検証
- 新たなパラダイムの開拓を目指す



	mass →	charge →	spin →																								
QUARKS	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	u	up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	c	charm	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	t	top	0	0	1	g	gluon	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$	0	0	0	H	Higgs boson	
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	d	down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	s	strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	b	bottom	0	0	1	γ	photon							
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	e	electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	μ	muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	-1	$1/2$	τ	tau	0	0	1	Z	Z boson							
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$1/2$	ν _e	electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	ν _μ	muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	ν _τ	tau neutrino	±1	0	1	W	W boson							



ニュートリノ振動 (復習)

$$(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)^T = U_{\text{MNS}}^{MN S} (\nu_1, \nu_2, \nu_3)^T$$

U^{MNS} は牧・中川・坂田行列

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta_{12} & \sin \vartheta_{12} & 0 \\ -\sin \vartheta_{12} & \cos \vartheta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \vartheta_{13} & 0 & \sin \vartheta_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \vartheta_{13} e^{i\delta} & 0 & \cos \vartheta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \vartheta_{23} & \sin \vartheta_{23} \\ 0 & -\sin \vartheta_{23} & \cos \vartheta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$P(\overset{(-)}{\nu}_\alpha \rightarrow \overset{(-)}{\nu}_\beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \frac{(m_i^2 - m_j^2)L}{4E_\nu}$$

$$(\pm) 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin \frac{(m_i^2 - m_j^2)L}{2E_\nu}$$

ニュートリノが通過する物質の効果加わる

ニュートリノ振動パラメータは 4 (混合行列) + 2 (質量の二乗差)

$\theta_{23} \sim 45 \pm 5^\circ$ $\Delta m_{23}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$	$\theta_{12} \sim 34 \pm 3^\circ$ $\Delta m_{21}^2 = 7.6 \times 10^{-5} \text{eV}^2$	$\theta_{13} \sim 9^\circ$	$\delta = \text{unknown}$
大気ニュートリノ、 加速器ニュートリノ	太陽ニュートリノ、 原子炉ニュートリノ	加速器ニュートリノ、 原子炉ニュートリノ	加速器ニュートリノ、 大気ニュートリノ

$\Delta m_{32}^2 = m_3^2 - m_2^2 > 0$ (正階層) か $\Delta m_{32}^2 < 0$ (逆階層) も未決定

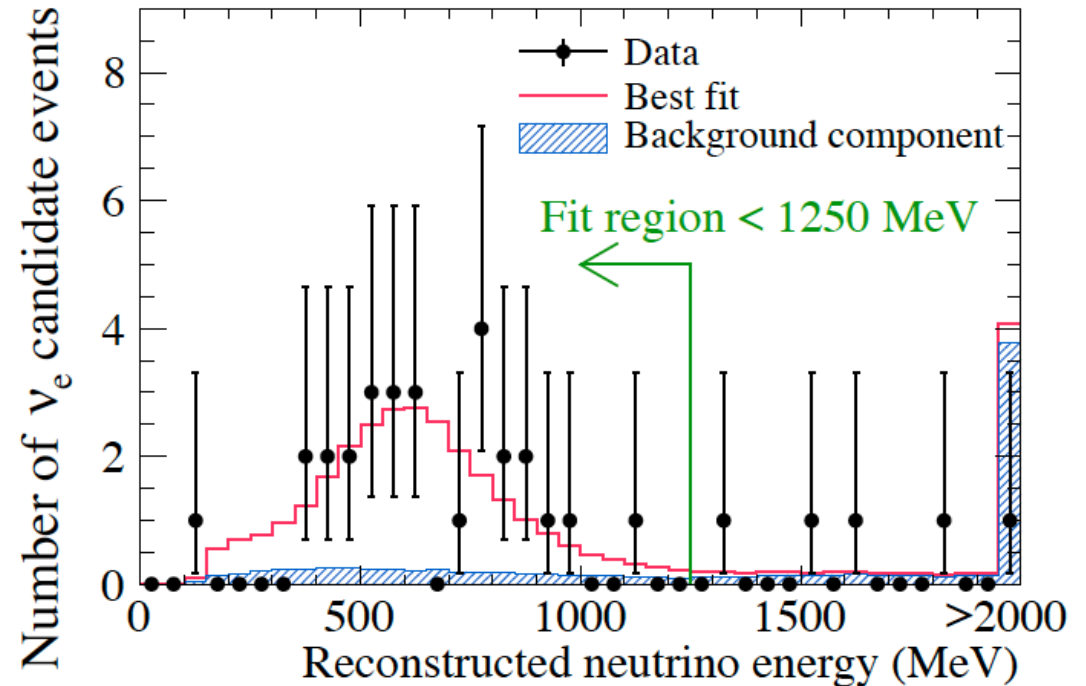
θ_{23} が本当に *Maximal Mixing* かどうか興味深い実験的課題

T2K (JPARC ν +Super-K)

consistent with reactor experiments



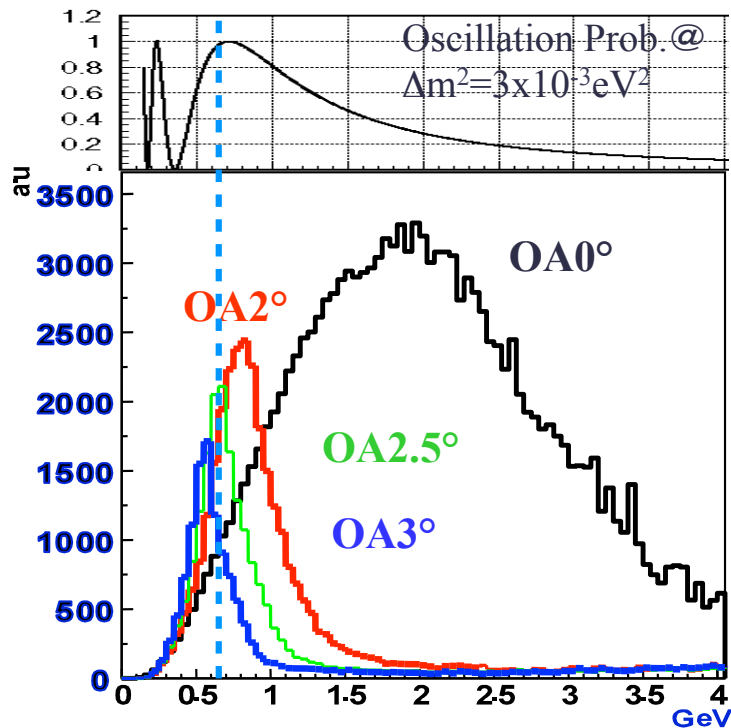
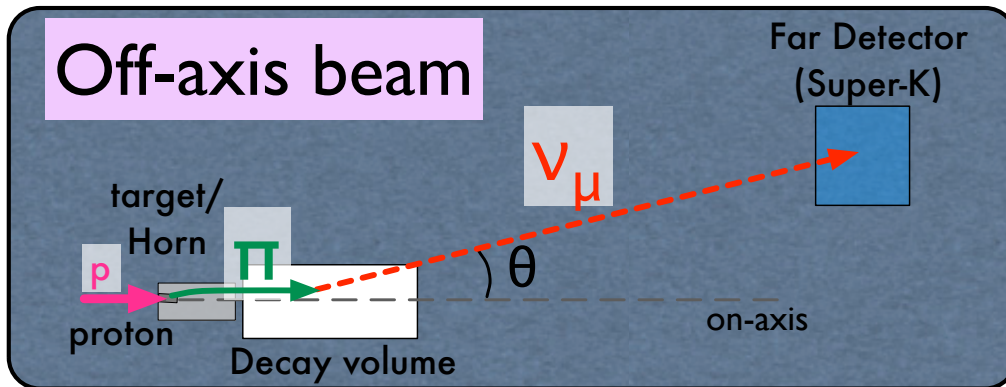
$N_{\text{obs}} : 28 \nu_e$ candidates
 $N_{\text{exp}} : 4.9 \pm 0.6 (\text{syst})$
for $\sin^2 2\theta_{13} = 0$
(6.57×10^{20} POT)



“Clean $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ appearance measurement” has been established! → make CPV test possible

- S/N~5 or so, clean ν_e appearance signal can be observed.
- Key elements are (i) narrow-band sub-GeV clean ν_μ beam, (ii) 300km baseline, and (iii) high performance large water Cherenkov detector

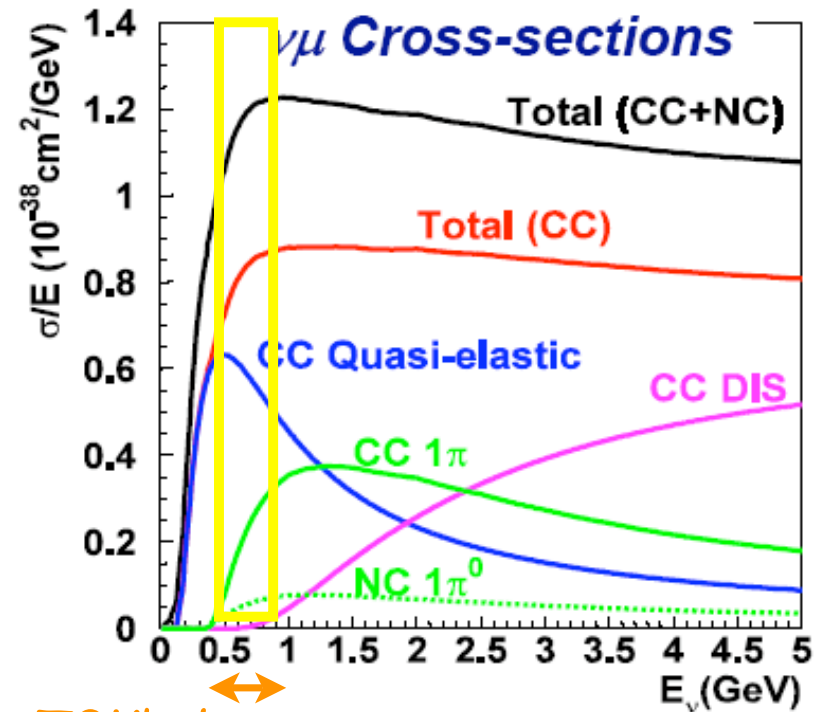
JPARC ν : off-axis sub-GeV narrow-band beam



$$E_{\nu} = |\Delta m^2_{32}|L / (2\pi) \sim 0.6 \text{ GeV}$$

First OM for Super-K at $L=295 \text{ km}$

- beam ν_e (0.5% at OM) \rightarrow low BG

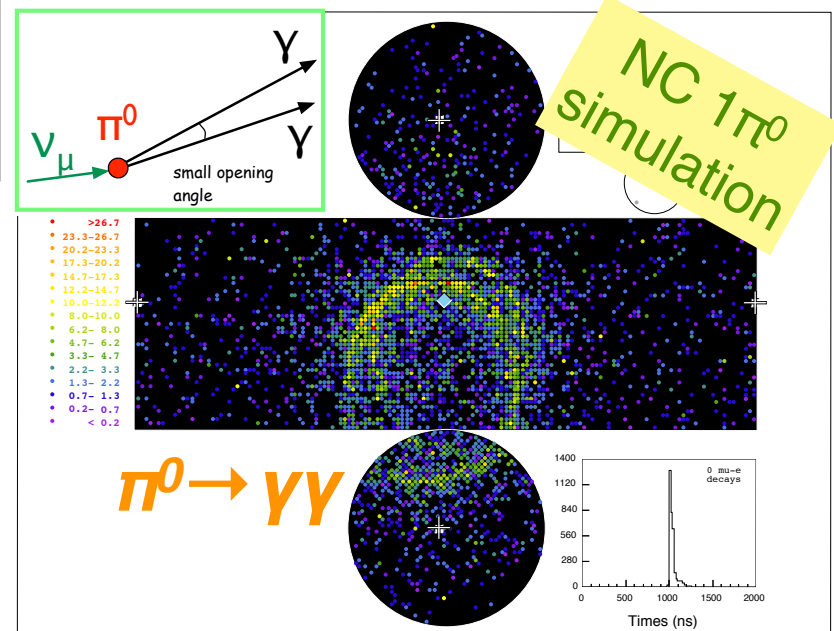
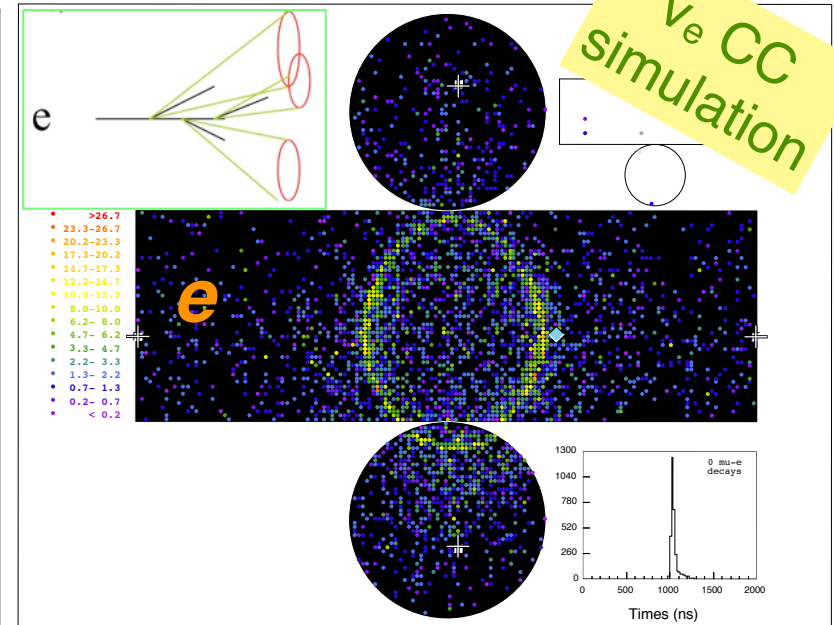


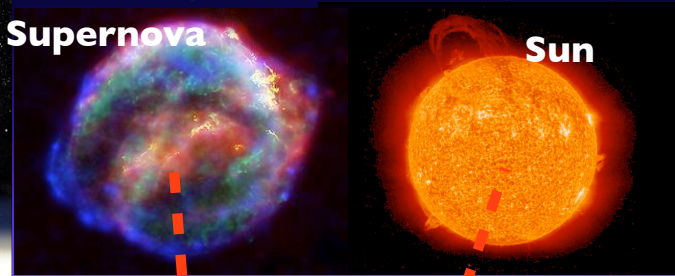
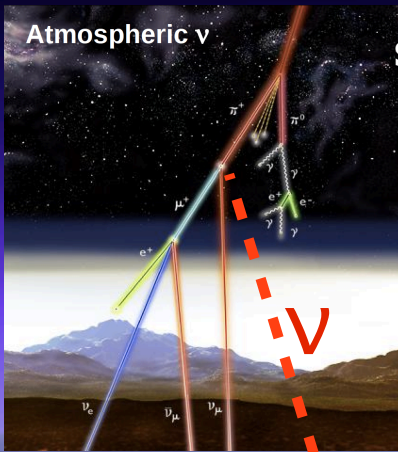
- CC Quasi-Elastic dominant \rightarrow high signal ϵ
- Small non-QE interactions (NC π^0 , $\mu^- \pi^+$ etc) \rightarrow low backgrounds

Water Cherenkov technique

- For ν_e appearance in T2K (J-PARC beam)
 - ν_e signal efficiency $\sim 60\%$
 - BG $\nu_\mu + \text{anti}\nu_\mu \text{CC} < 0.1\%$, $\text{NC}\pi^0 \sim 1\%$ ($0.1 < E_{\text{rec}}^{\nu} < 1.25 \text{ GeV}$, can be optimized in future)
- Excellent particle ID capability $> 99\%$
- Energy resolution for e and $\mu \sim 3\%$
- Energy threshold $\sim 5 \text{ MeV}$
 - Supernova ν , solar ν ...
- Stable operation
 - energy scale stability $\sim 1\%$
 - livetime for physics analyses $> 90\%$

Excellent detector performance
&
Scalability

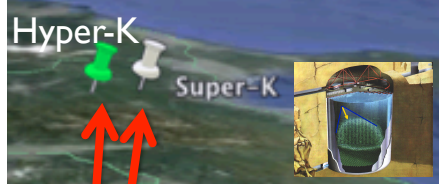
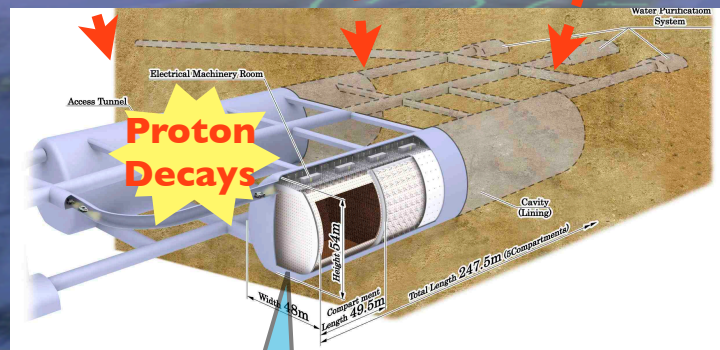




ハイパーカミオカンデ

- ▶ ν のCP対称性の破れ
- ▶ 核子崩壊
- ▶ 大気・太陽・超新星爆発 ν 等

Hyper-K WG, arXiv:1109.3262 [hep-ex]



$\sim 0.6\text{GeV } \nu_\mu$
295km baseline

x25 ν 標的
& 核子崩壊ソース

より大強度の ν ビーム
(J-PARCアップグレード)

100万トン
(有効質量56万トン)

×2(強度×年)



大型先端検出器による 核子崩壊・ニュートリノ振動実験

- 100万トン級超大型水チェレンコフ検出器

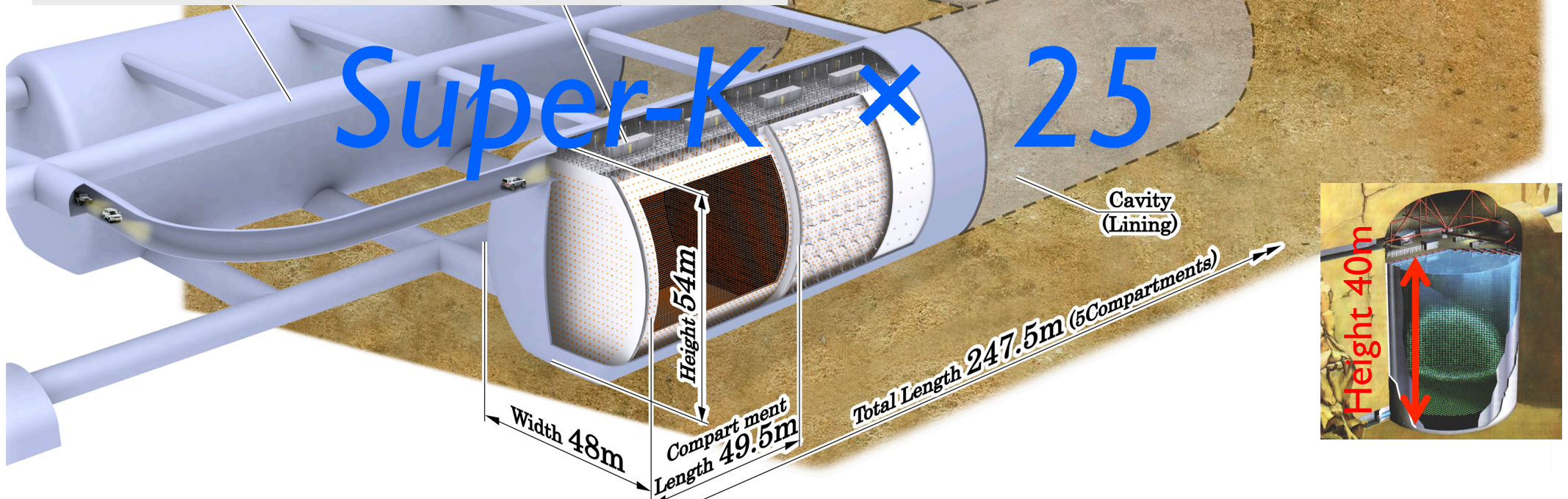
ハイパーカミオカンデ

- J-PARCからのニュートリノビーム(~1MW以上)+前置検出器
長基線振動実験でのCP非対称性の探索
- 陽子崩壊の探索
- 大気ニュートリノ, 太陽ニュートリノ, 超新星ニュートリノ
等の測定による素粒子・宇宙物理の展開
- 国内参加機関：東京大学宇宙線研究所, 高エネルギー加速器研究機構,
東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構, 東京大学,
京都大学, 東北大学, 名古屋大学, 神戸大学, 大阪市立大学,
東京工業大学, 宮城教育大学, 岡山大学など

Hyper-Kamiokande detector

Letter-of-Intent for conceptual design and physics sensitivities: arXiv:1109.3262 [hep-ex] ~100 pages

Total Volume: 1 million ton (20×Super-K)
Photo-sensors: 50cm ϕ ×99,000 (Inner Detector)
20cm ϕ ×25,000 (Outer Detector)



(Optimistic) Timeline for anticipated results

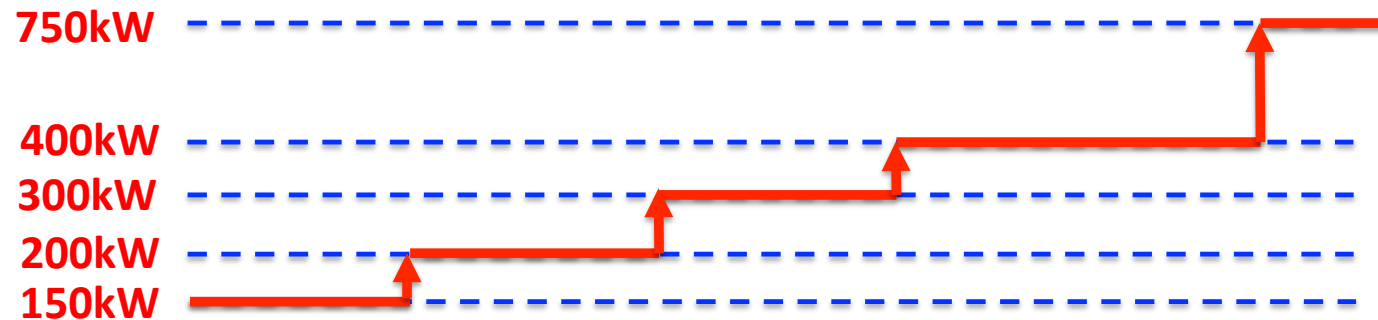
- 2022 ~2 σ CPV indication ($\sin^2\delta=1$) by T2K+reactors (also in Nova)
- 2023 Start Hyper-K data taking
- 2026 Discovery of leptonic CPV w/ >5 σ (MH at the same time or earlier)
- 2028 Discovery of proton decays
- 20XX Always ready for Supernova neutrino burst

J-PARC power upgrade

Sekiguchi@NNN13



MR Upgrade Timeline

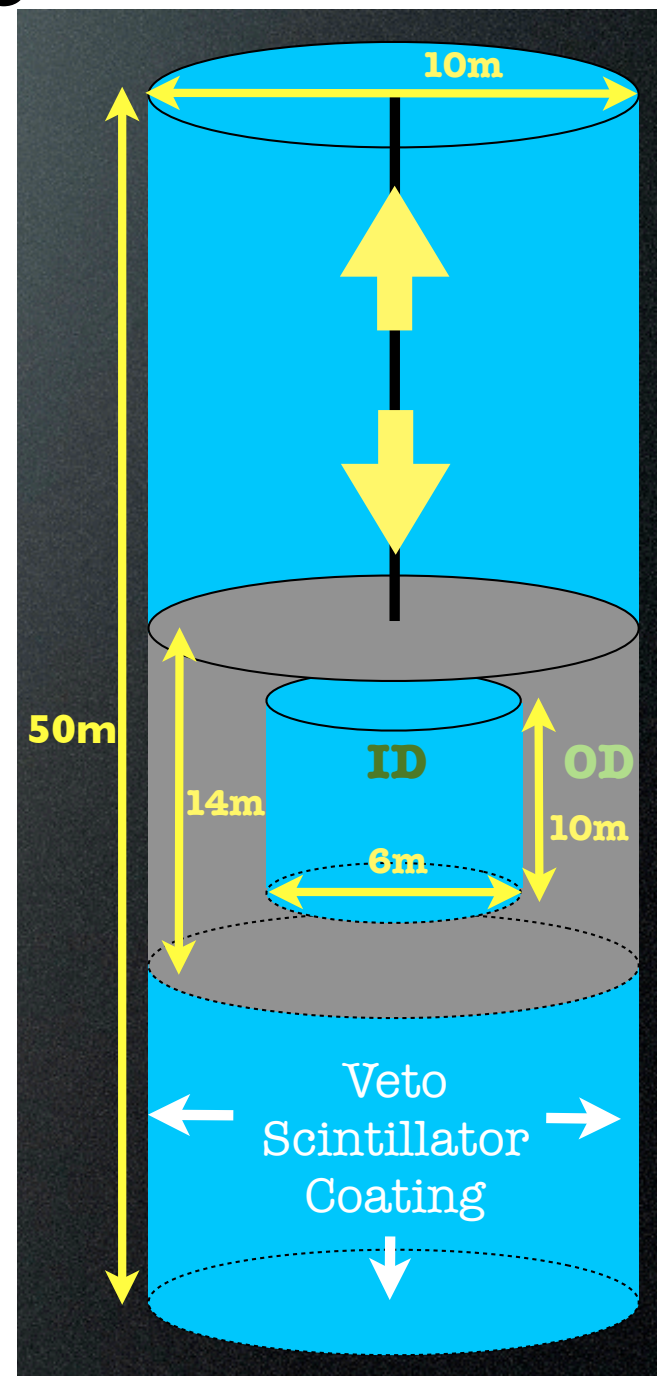


JFY	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
			Li. upgrade				
FX power [kW]	150	200	300	400			750
Cycle time of main magnet PS New magnet PS for high rep.	3.04 s	2.56 s	2.4 s				1.3 s
	R&D		R&D		Manufacture installation/test		
Present RF system New high gradient rf system	Install. #7,8	Install. #9					
	R&D		Manufacture installation/test				
Ring collimators	Additional shields	Add.collimators and shields (2kW)	Add.collimators (3.5kW)				
Injection system FX system	New injection kicker	Kicker PS improvement, Septum 2 manufacture /test			LF septum, PS for HF septa manufacture /test		

前置 ν 検出器@1km for J-PARC beam

概念設計中

- HKの要素試験も兼ねる可能性
 - 水槽ライナー構造
 - 新型光センサー、電子回路
 - 純水システム
 - キャリブレーション系等
- 豊富な物理
 - 各高さ (off-axis、 $E\nu$) での ν 測定 (エネルギースキャン)、水ターゲット
 - $E\nu$ の関数での $\nu\mu$ 、 νe 相互作用測定
 - $E\nu$ の関数での $NC\pi^0$ 測定
 - ニュートリノ振動解析の感度向上
 - ステライルニュートリノ探索



International Hyper-K Working Group

4th Open Hyper-K meeting (January 27-28, 2014) @ Kashiwa



- HK meeting: Aug. 2012, Jan. 2013, Jun. 2013., Jan.2014
- 毎回100名程の参加者. カナダ、日本、韓国、ロシア、スペイン、スイス、英国、米国他
- 関心のある関係者にオープン. 参加を歓迎します.
- 次回は7月19-21日@バンクーバー。

ニュートリノ振動研究

加速器ニュートリノ

+ 大気ニュートリノ

ν physics targets of Hyper-K

- ▶ レプトンセクターのCPの破れ

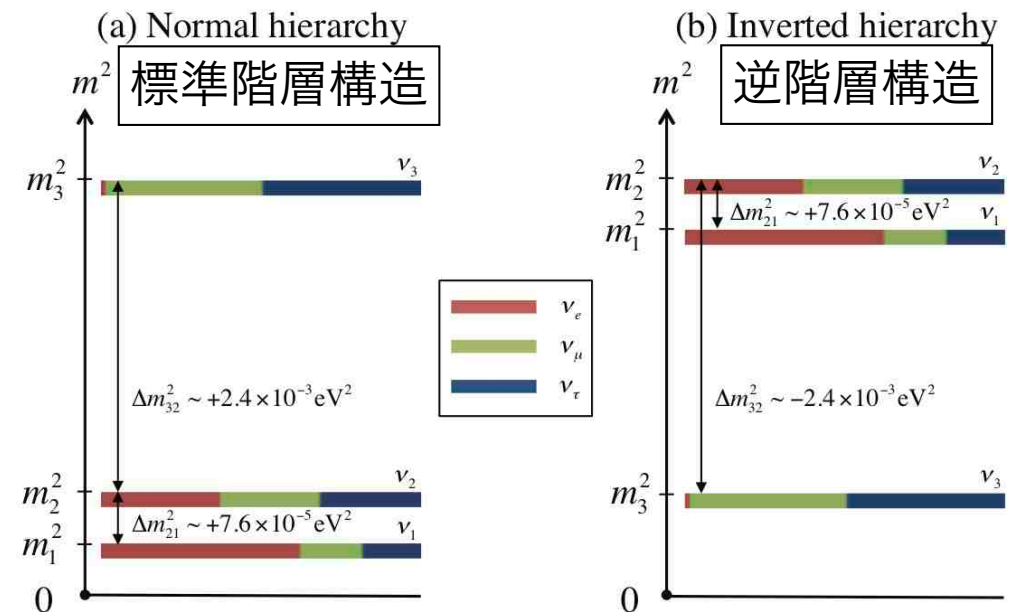
Dirac phase δ

- ▶ ν 質量階層構造

$\Delta m_{32}^2 > 0$ or $\Delta m_{32}^2 < 0$

- ▶ θ_{23} octant,

$\theta_{23} < \pi/4$ or $\theta_{23} > \pi/4$

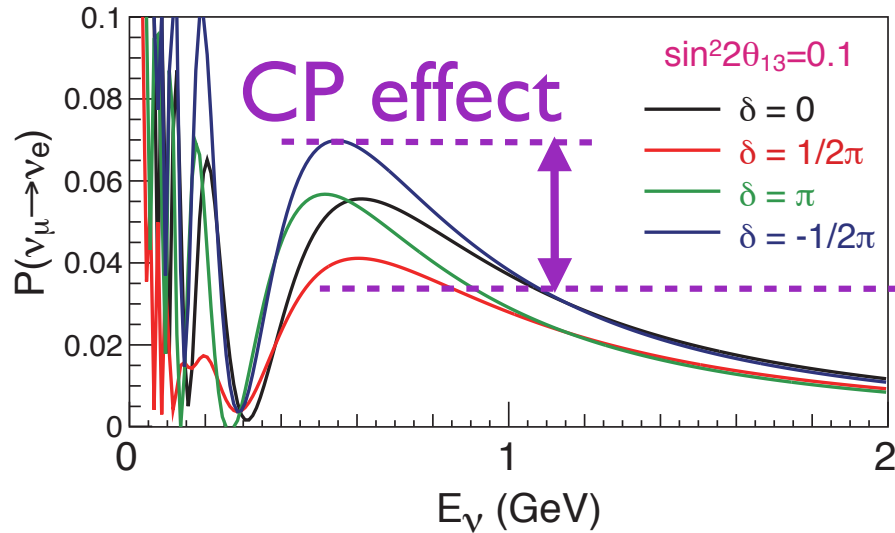


加速器 ν と大気 ν を用いて、振動パラメータの全容解明を目指す。

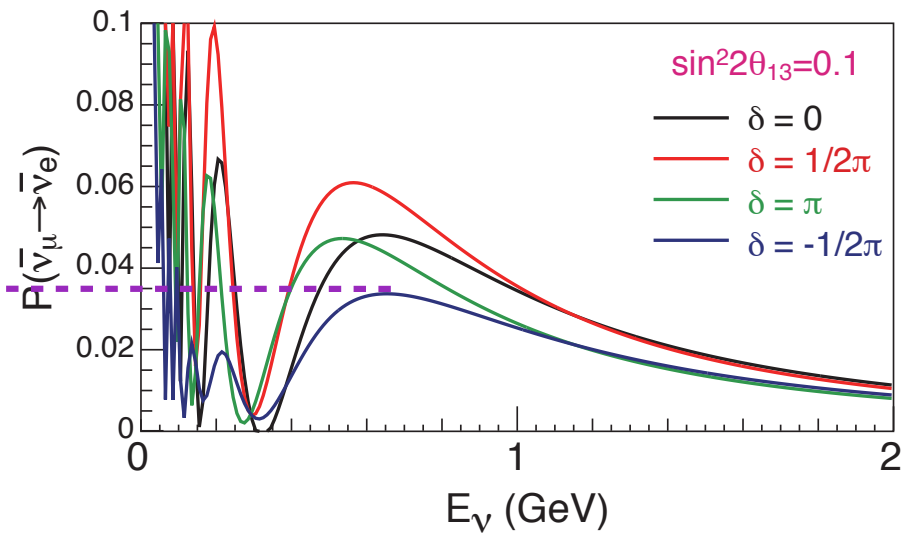
CP measurement w/ Hyper-K/J-PARCV

Appearance probability at Hyper-K (baseline=295km)

Normal hierarchy Neutrino



Anti-Neutrino



- ▶ Direct CPV test by comparing $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ and $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$. $>3\sigma$ for 70% of δ space.
- ▶ δ measurement (w/ precision of $10^\circ \sim 20^\circ$), Test of (exotic) CPV origin
- ▶ Good chance to determine MH by J-PARC ν alone (50% of δ space).
- ▶ High statistic atmospheric ν data will enable us to determine MH.

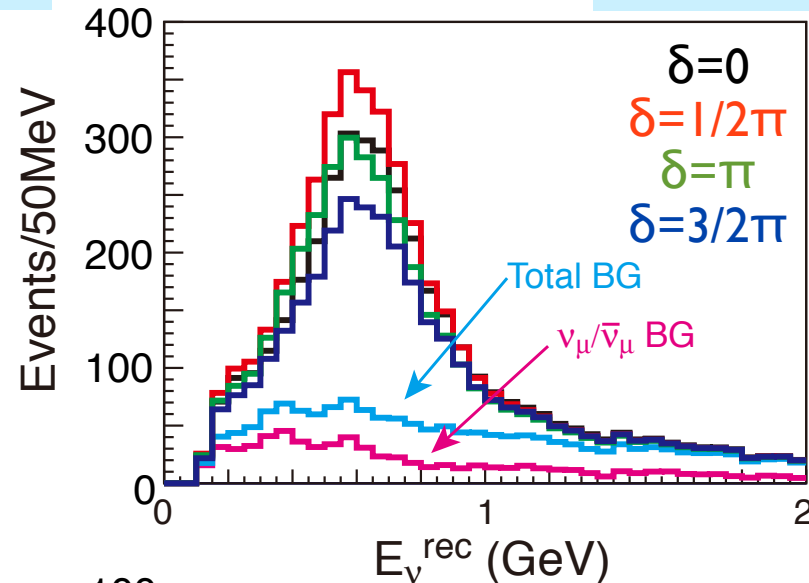
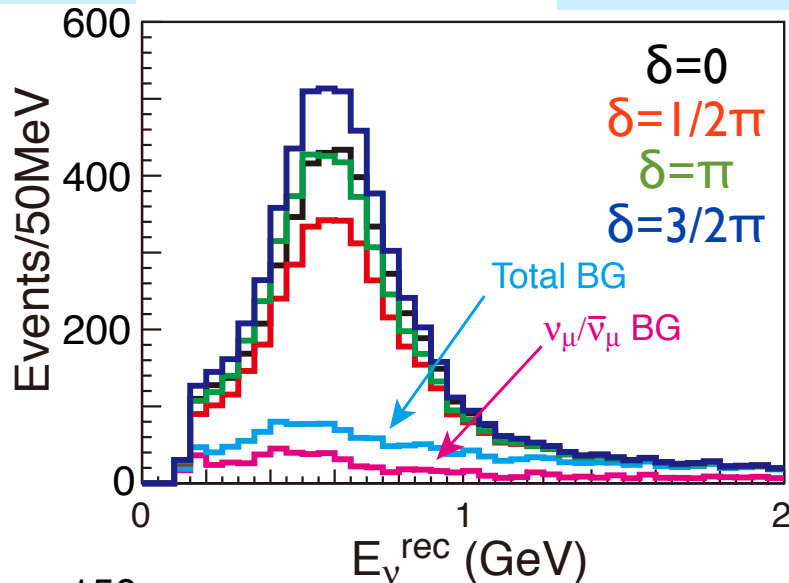
Expected ν_e CC candidates

$\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$

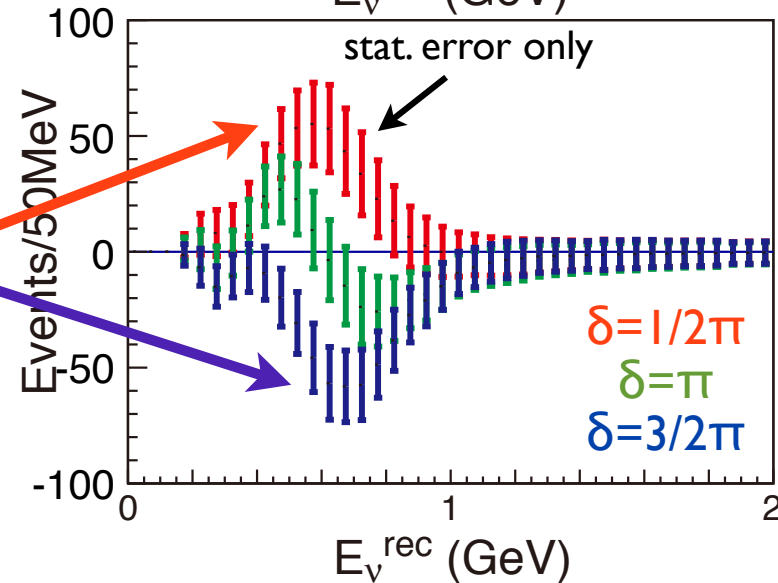
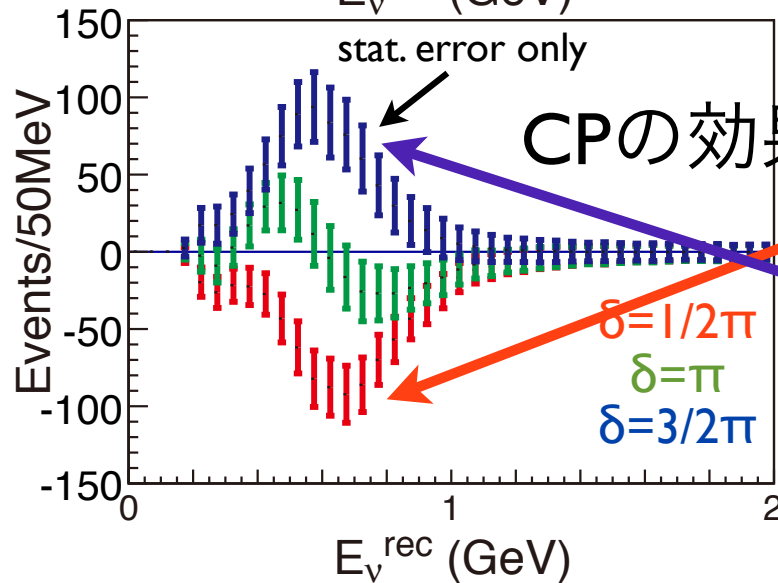
ν mode $0.75\text{MW} \times 3\text{yrs}$

$\bar{\nu}$ mode $0.75\text{MW} \times 7\text{yrs}$

ν_e candidates



diff. from $\delta=0$ case



- ν_e : ~ 3500 events, $\bar{\nu}_e$: ~ 2000 events
- $\pm 25\%$ variation due to CP δ

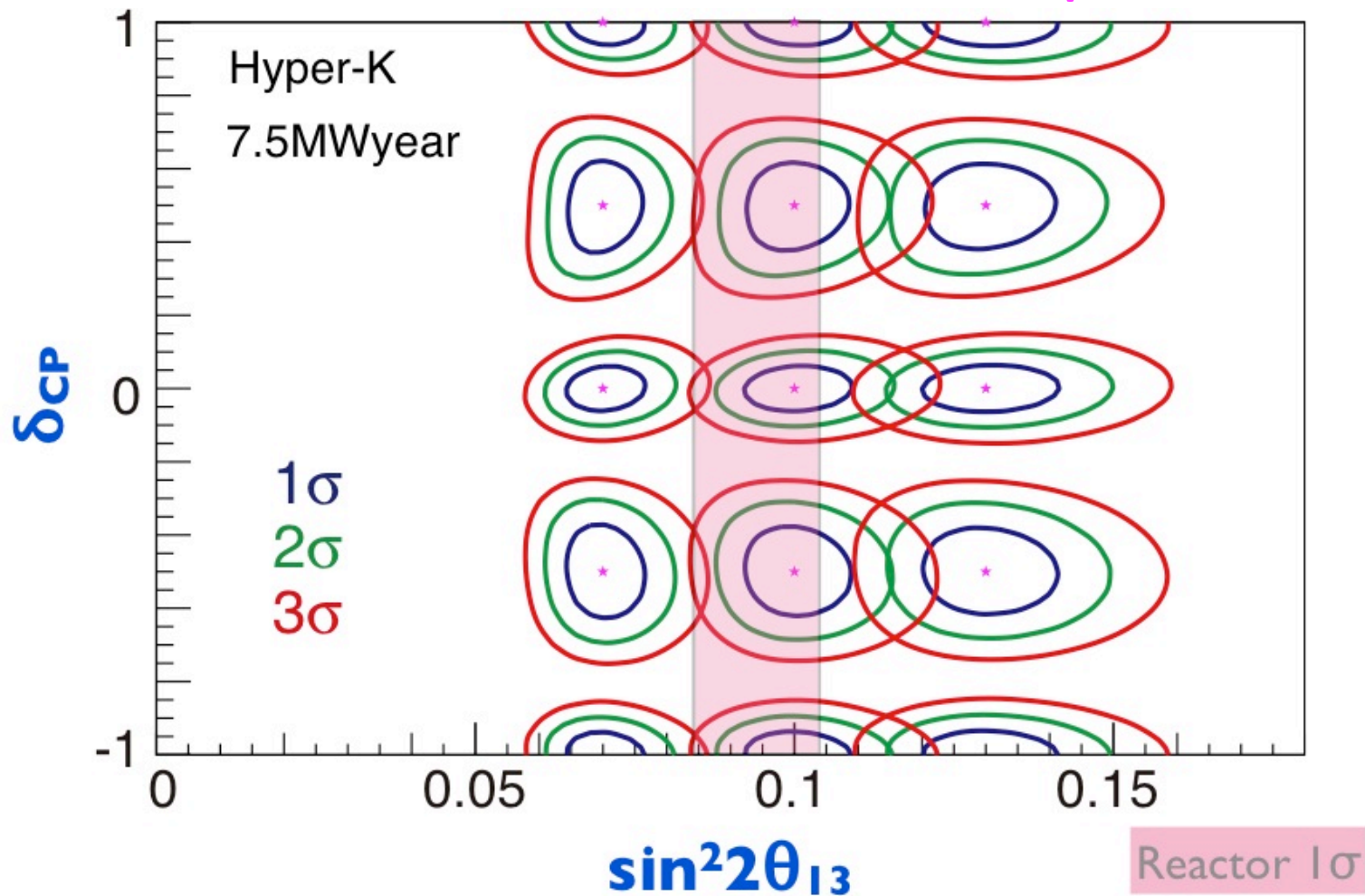
Contours

7.5MW · years

Normal mass hierarchy (known)

5% systematics on signal, ν_μ BG, ν_e BG, $\nu/\bar{\nu}$

★ true points



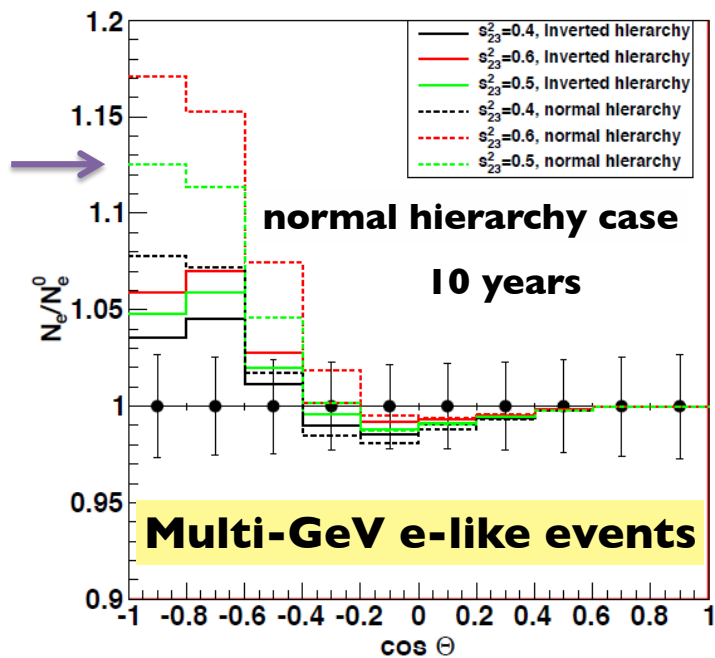
Good CP δ sensitivity

ニュートリノ振動研究

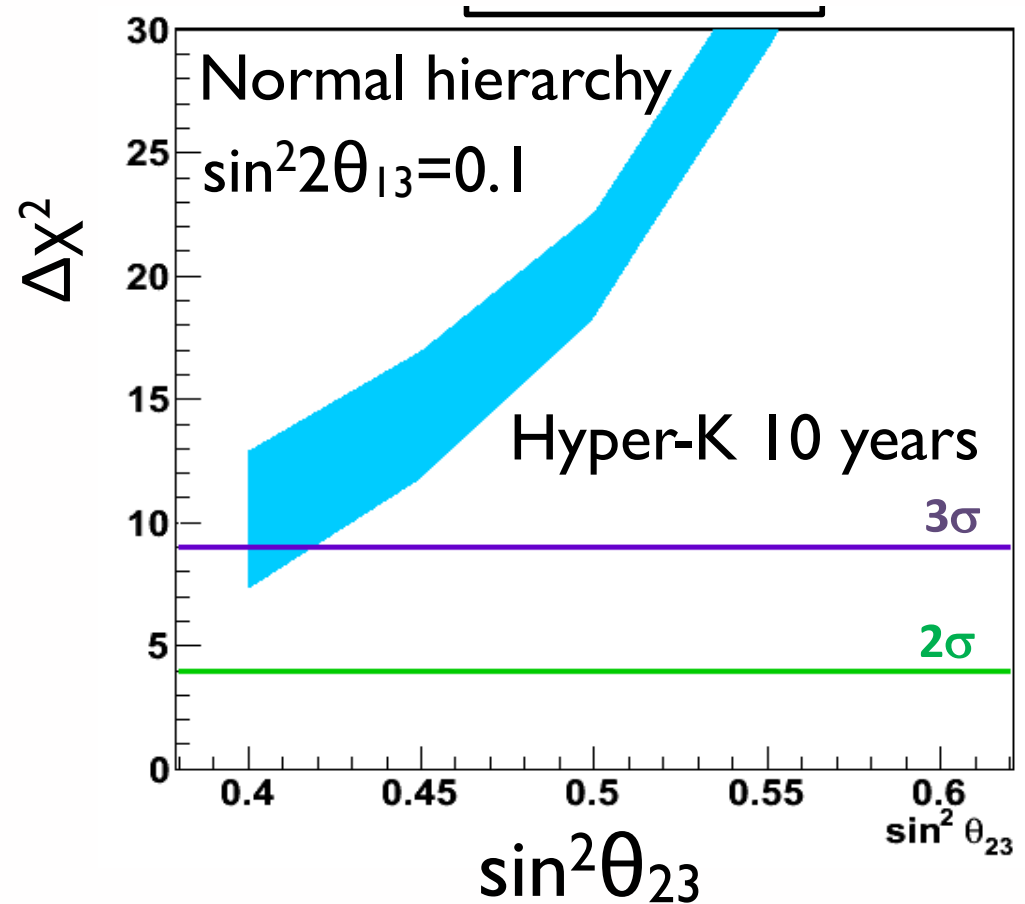
加速器ニュートリノ

+ 大気ニュートリノ

大気νによる質量階層の決定



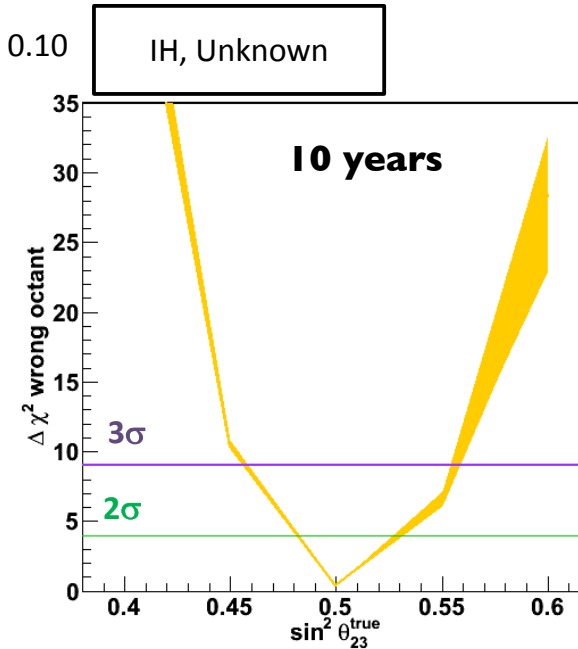
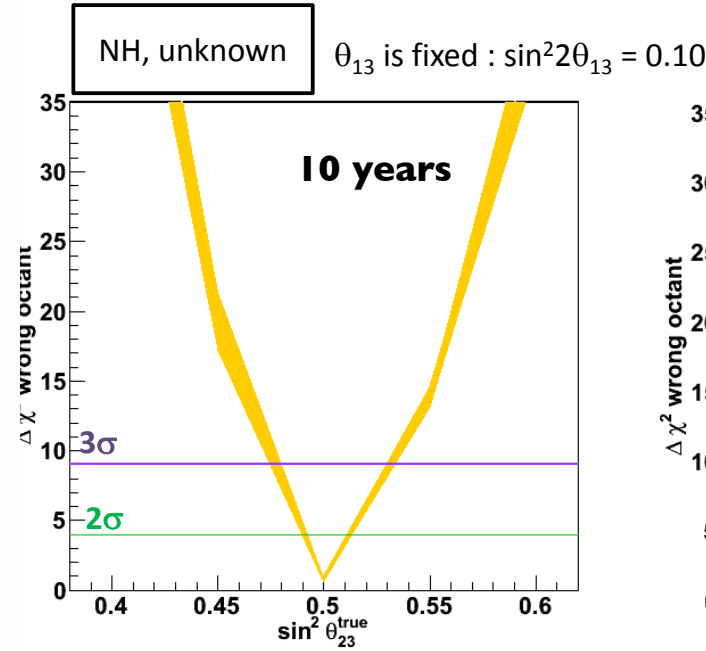
地球内部の物質効果
(MSW)による変化



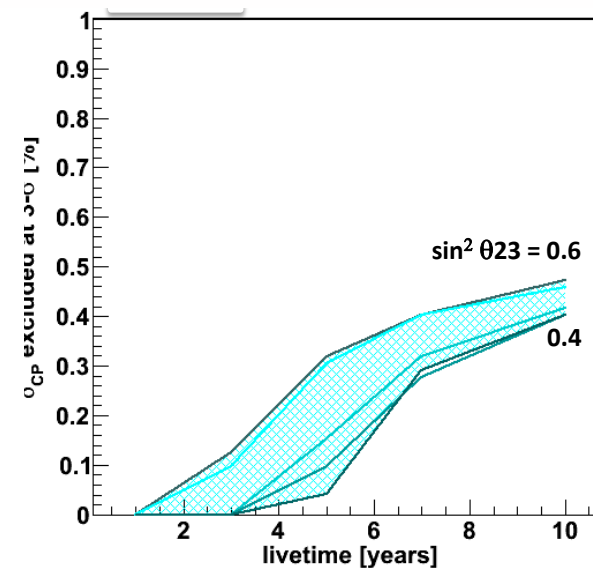
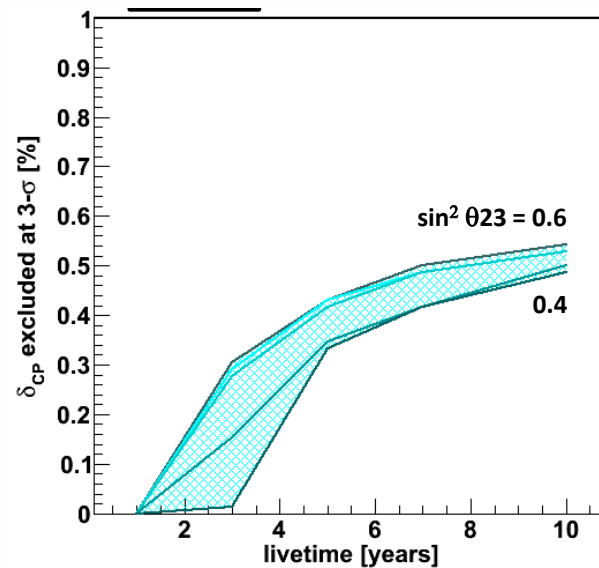
<10年の観測で、3 σ での決定が可能
(θ_{23} の値が大きければさらに良い感度)

大気ν: θ_{23} octant and CPV

θ_{23} octant sensitivity
(band depends on δ)



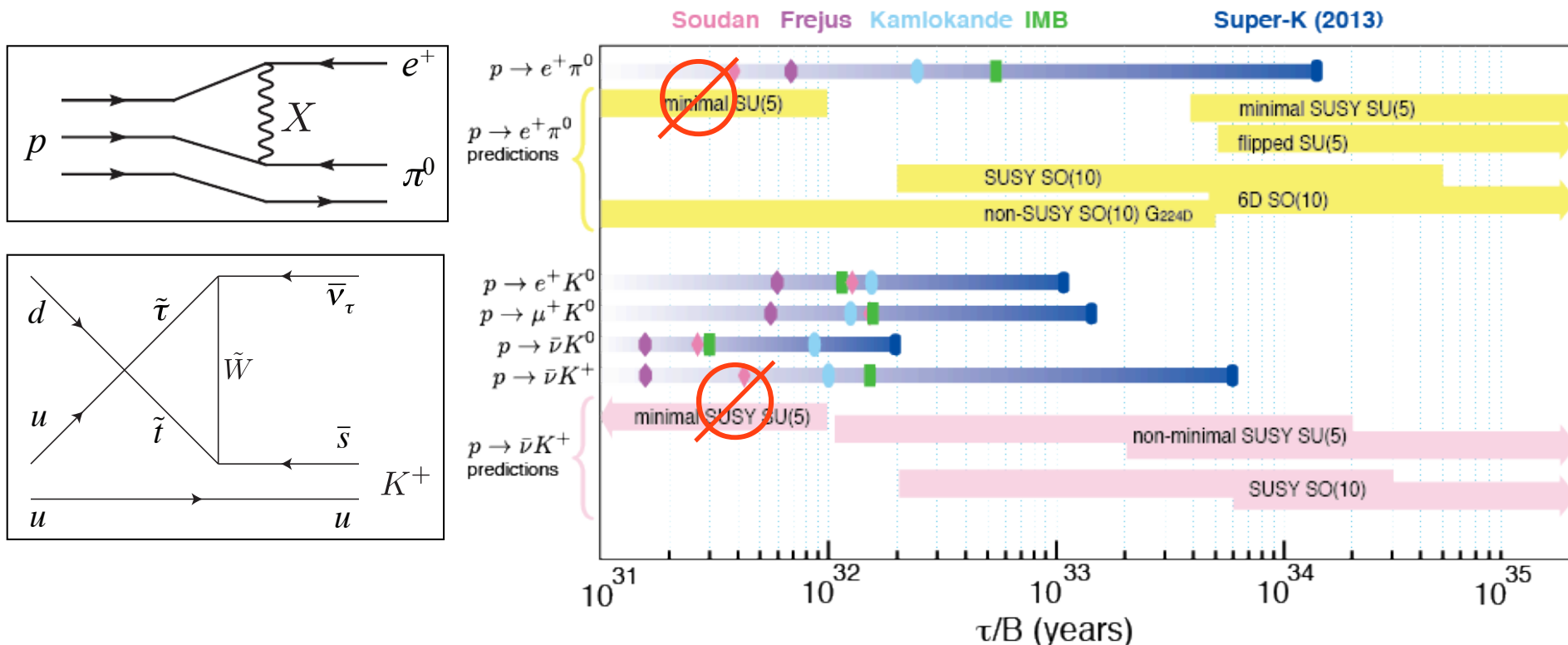
Fraction of δ_{CP} excluded
(3 σ)



加速器νと相補的な測定が可能

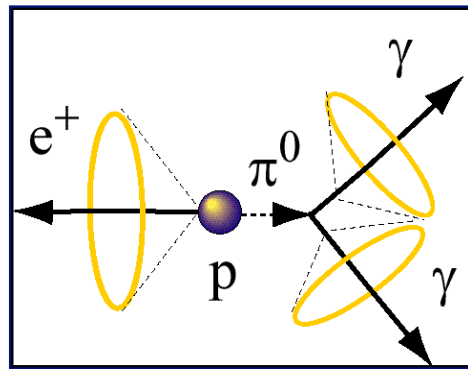
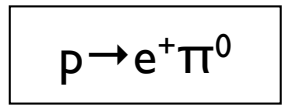
核子崩壞

これまでの結果 (制限)

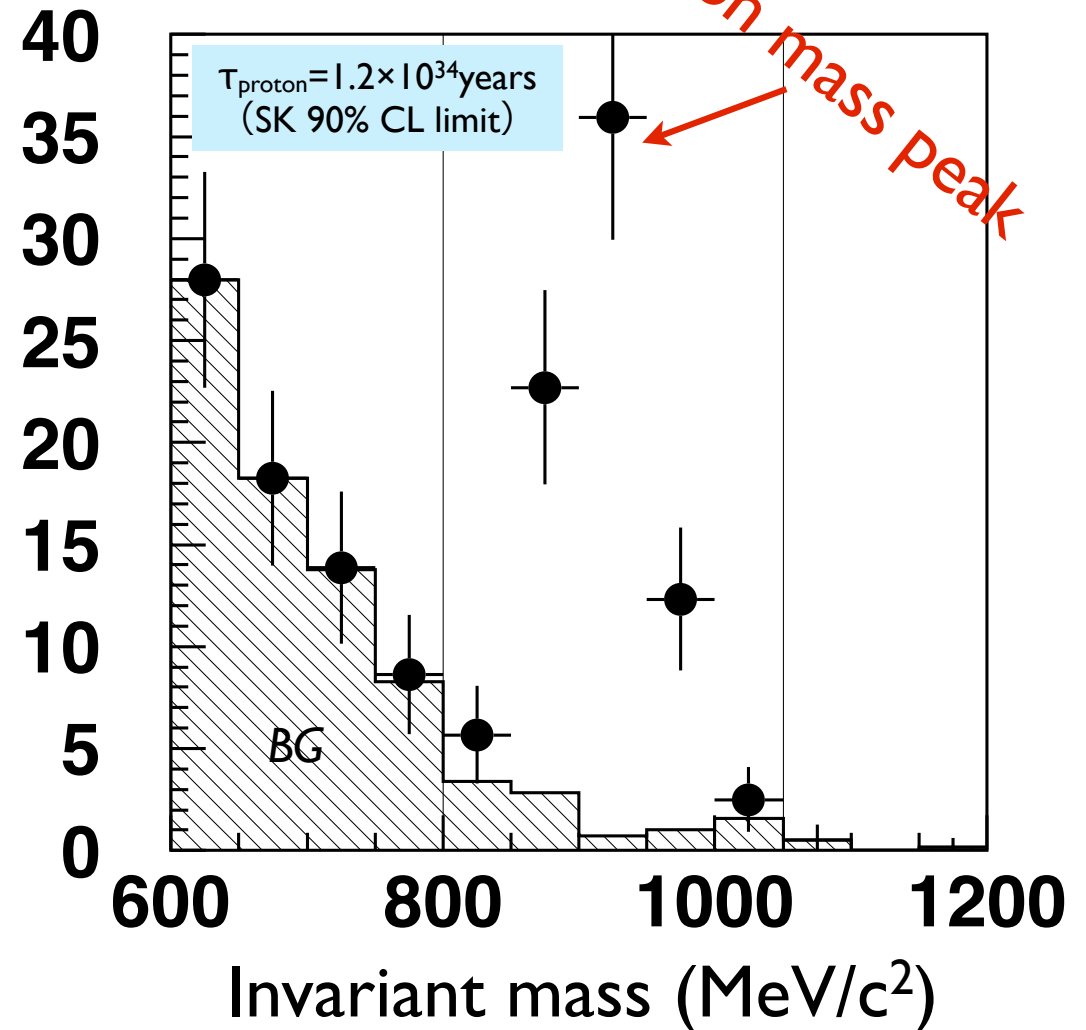


- ▶ Super-Kが世界最高の制限を多くの崩壊モードで与えている
 - ▶ $\tau(p \rightarrow e^+ \pi^0) > 1.4 \times 10^{34}$ years (90% C.L., 260kton · years)
 - ▶ $\tau(p \rightarrow \nu K^+) > 5.9 \times 10^{33}$ years (90% C.L., 260kton · years)
- ▶ 有意な信号観測されず \Rightarrow 統一モデルに制限を与えている
 - ▶ minimal $SU(5)$ や minimal SUSY $SU(5)$ は棄却された (と言われる)
- ▶ 発見は近いかもしれない!

発見の可能性

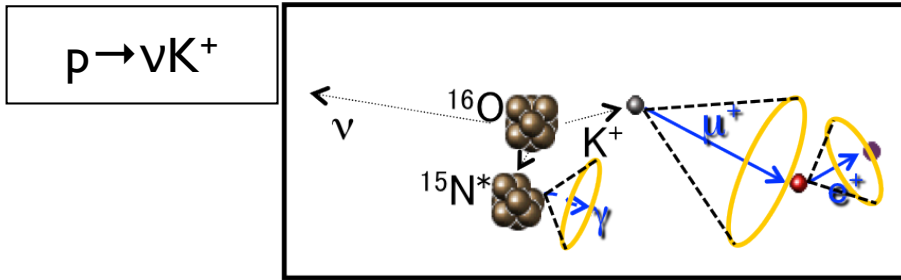


- ▶ Discovery reach (3σ)
 - ▶ $\tau(p \rightarrow e^+ \pi^0) \sim 5 \times 10^{34}$ years (HK 10yrs)
- ▶ Limit (90%CL)
 - ▶ $\tau(p \rightarrow e^+ \pi^0) > 1 \times 10^{35}$ years (HK 10yrs)

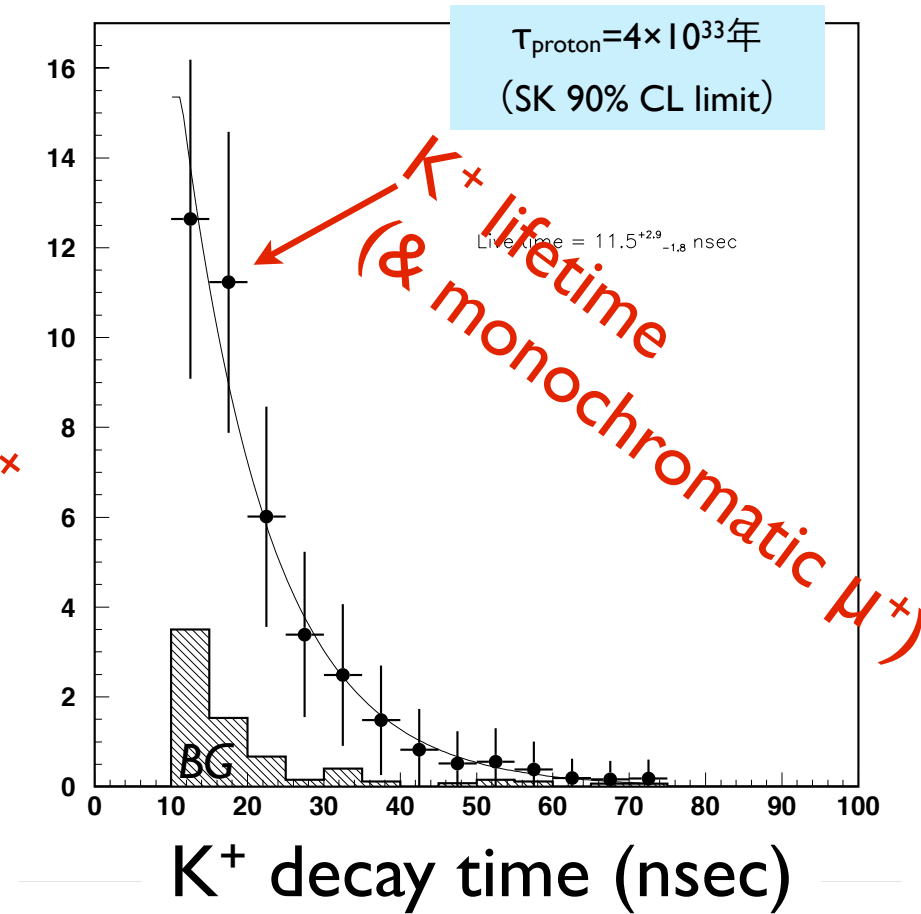
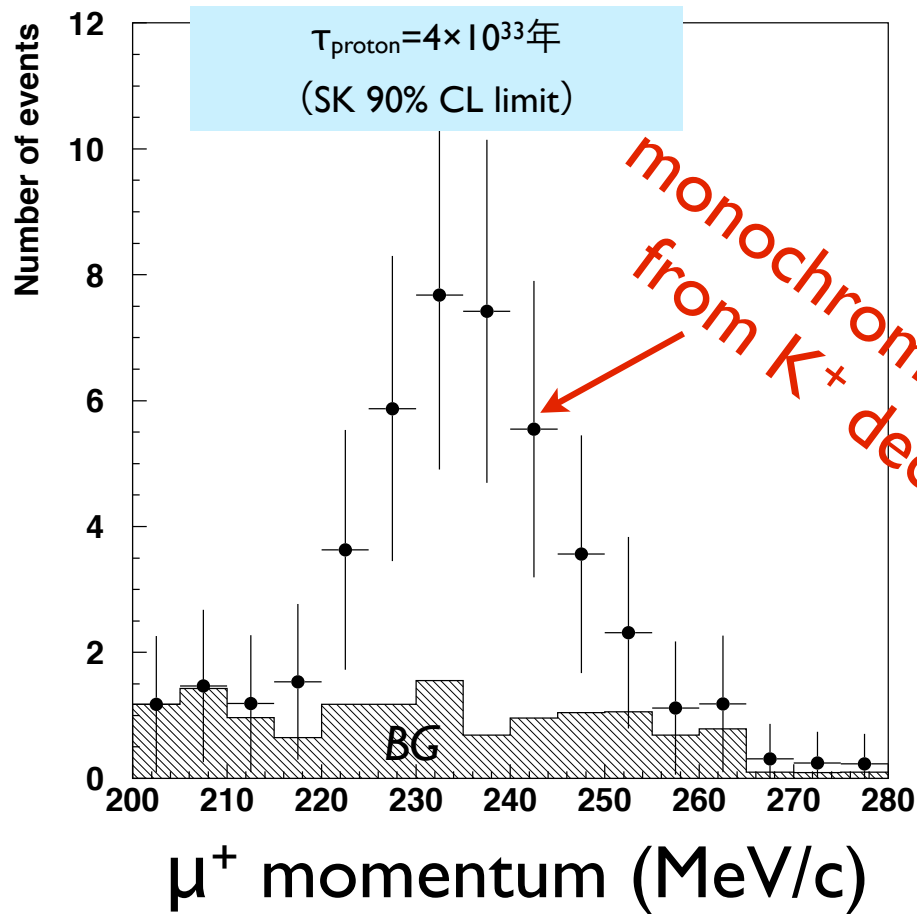


水チェレンコフ技術は寿命 10^{35} 年に到達する唯一の現実的な提案

発見の可能性 (2)



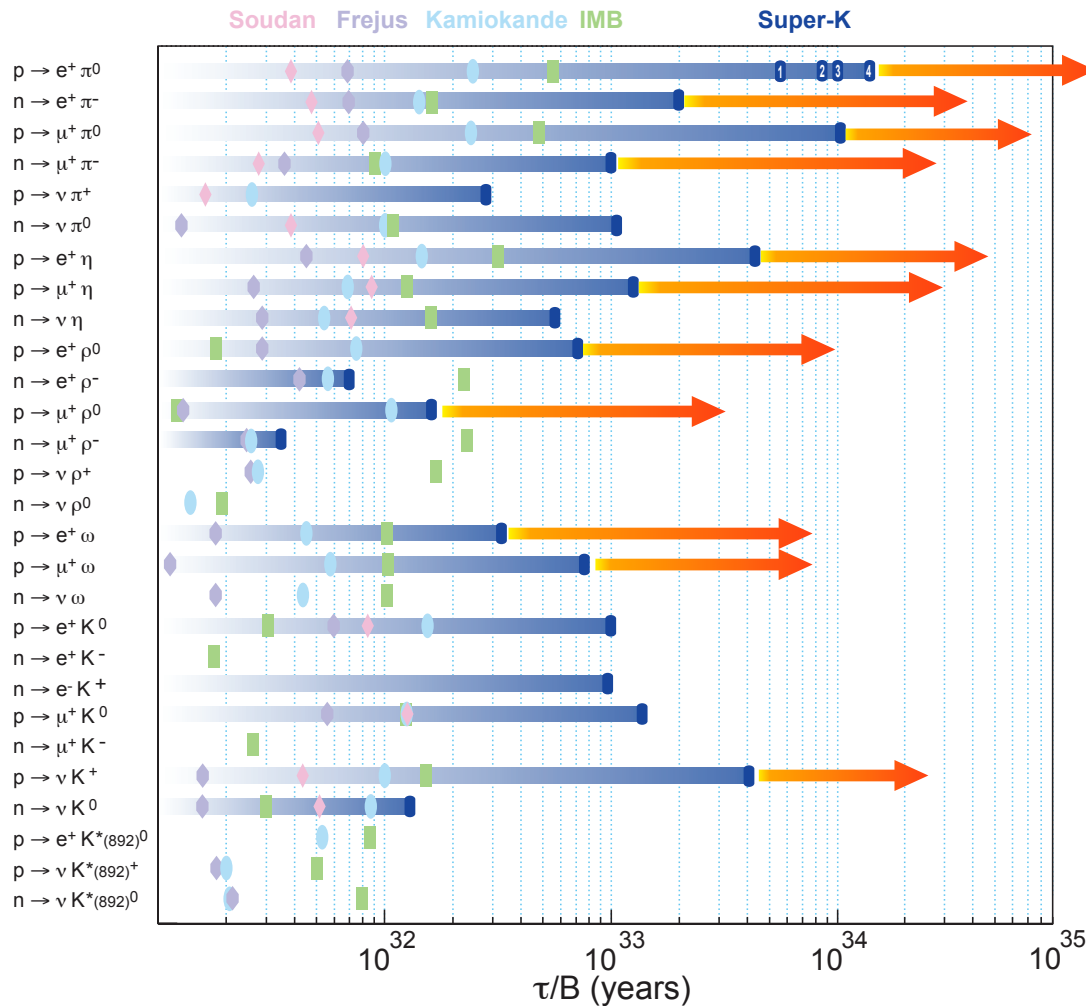
- ▶ Discovery reach (3σ)
 - ▶ $\tau(p \rightarrow \nu K^+) \sim 1 \times 10^{34}$ years (HK 10yrs)
- ▶ Limit (90%CL)
 - ▶ $\tau(p \rightarrow \nu K^+) > 3 \times 10^{34}$ years (HK 10yrs)



超対称性模型の検証も期待

多くの崩壊モードの探索可能

- many models predicts branching ratio of $p \rightarrow e^+ \eta, e^+ \rho, e^+ \omega$ are 10~20%
- Flipped SU(5) (Ellis) predicts $\text{Br}(p \rightarrow e^+ \pi^0) \sim \text{Br}(p \rightarrow \mu^+ \pi^0)$
- (B-L)非保存モード、 $|\Delta B|=2$ など。バリオジェネシスとの関係？



Hyper-K sensitivities

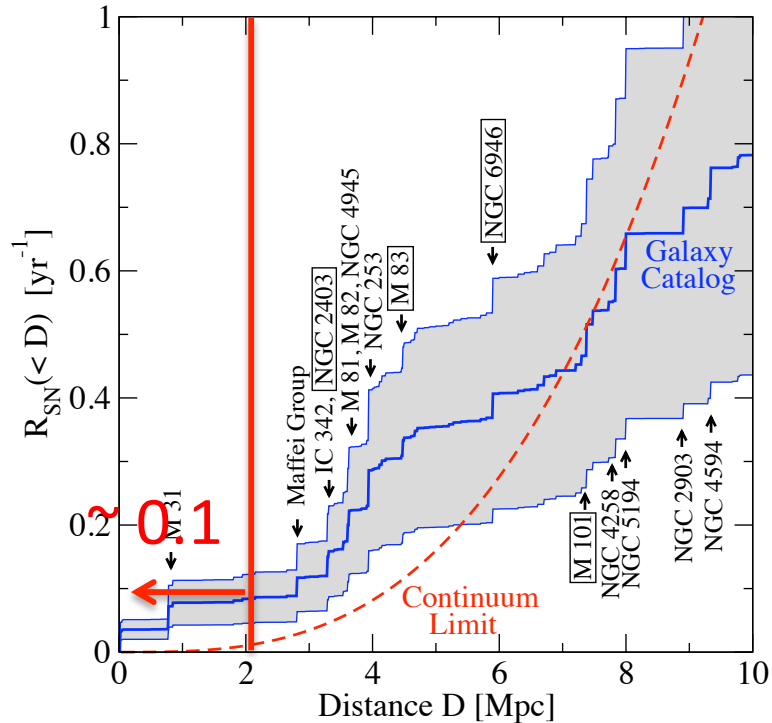
- ▶ $p \rightarrow e^+ + \pi^0$
 - ▶ $\tau_{\text{proton}}/\text{Br} > 1.3 \times 10^{35}$ years @90%CL
 - ▶ 5Mton×years (9 Hyper-K years)
- ▶ $p, n \rightarrow (e^+, \mu^+) + (\pi, \rho, \omega, \eta)$
 - ▶ $O(10^{34-35})$ years
- ▶ SUSY favored $p \rightarrow \nu + K^+$
 - ▶ 2.4×10^{34} years
- ▶ K^0 modes, $\nu \pi^0, \nu \pi^+$ possible
- ▶ その他多くの崩壊モードの探索可能
 - ▶ (B-L) violated modes
 - ▶ radiative decays $p \rightarrow e^+ \gamma, \mu^+ \gamma$
 - ▶ neutron-antineutron振動 ($|\Delta B|=2$)
 - ▶ di-nucleon decays ($|\Delta B|=2$)
 - ▶ $pp \rightarrow XX \dots, nn \rightarrow XX \dots$

宇宙素粒子物理学

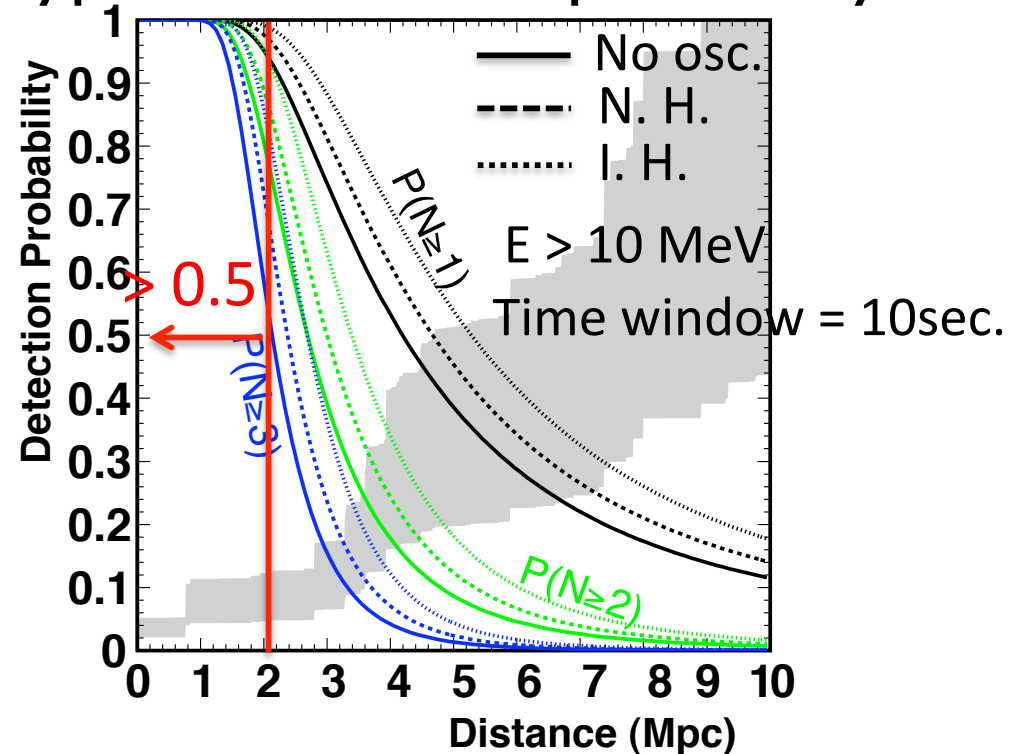
- 超新星爆発ニュートリノ
 - ~20万イベント @ 10kpc (ν バースト)
 - 200~600ev/10年 (SN Relic ν)
- 太陽 ν
 - 200ev/day、短期間での時間変動検証
 - 地球の物質効果 (昼夜変化)
- Indirect WIMP search
 - $\sigma_{\text{SpinDep.}} < 10^{-39 \sim -40} \text{cm}^2$ (SK 90年相当)
- Solar Flare ν 探索
- 地球コアのニュートリノトモグラフィ

Supernova neutrinos

Cumulative supernova rate



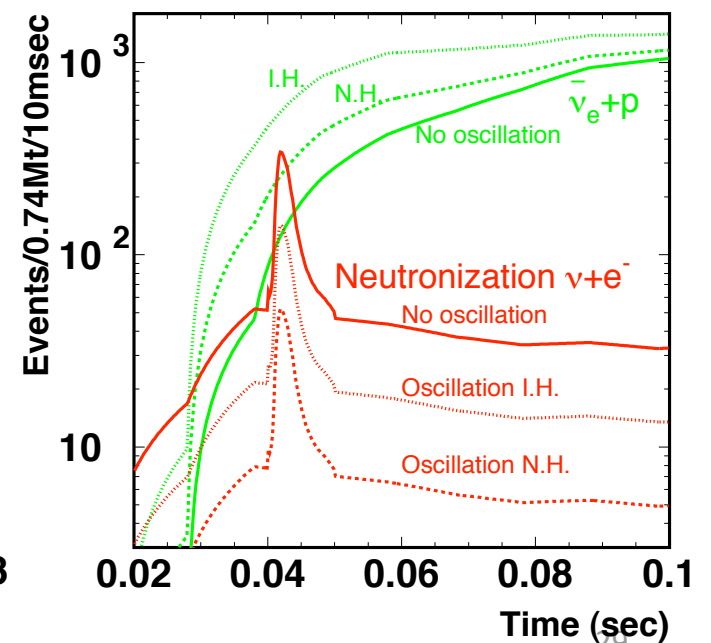
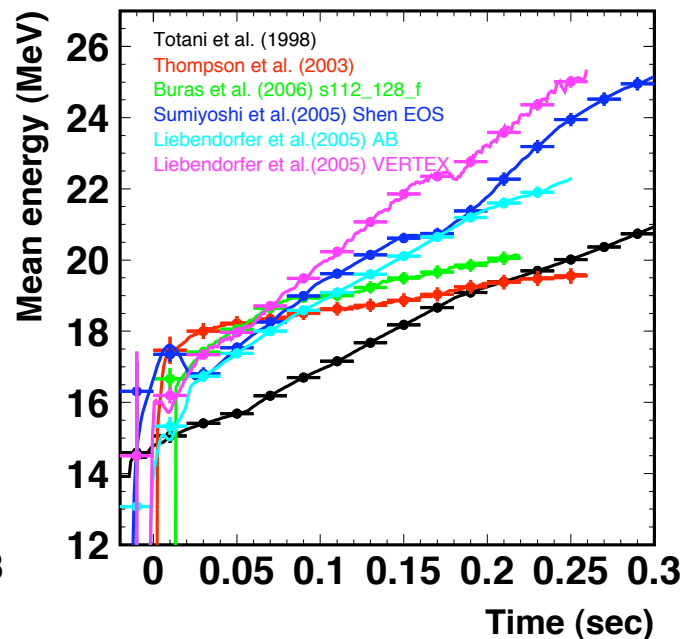
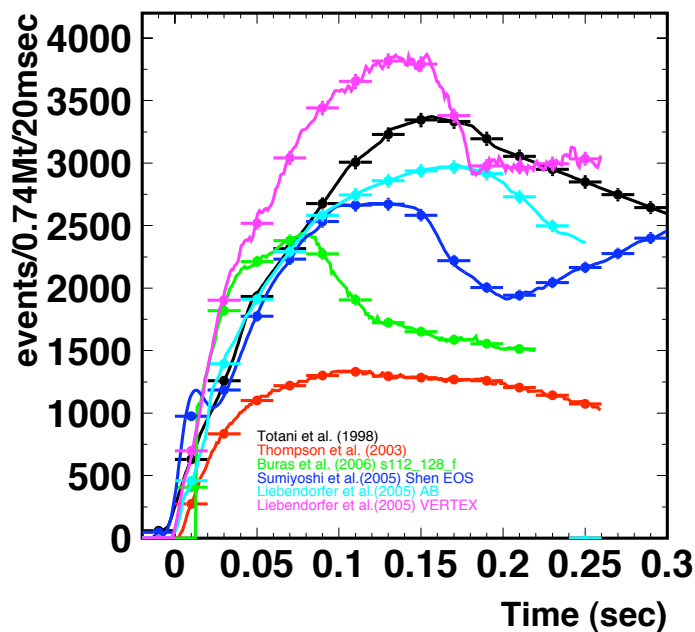
Hyper-K detection probability



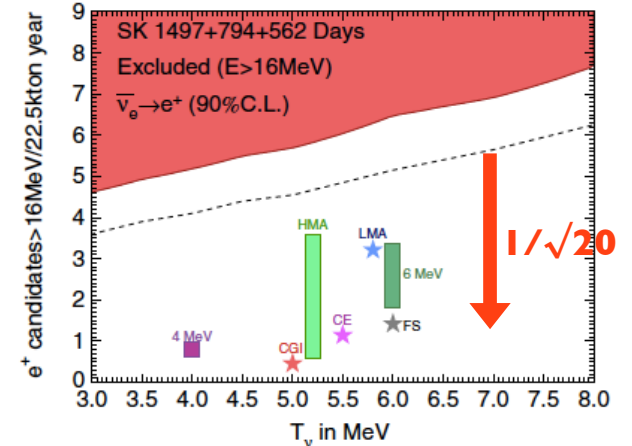
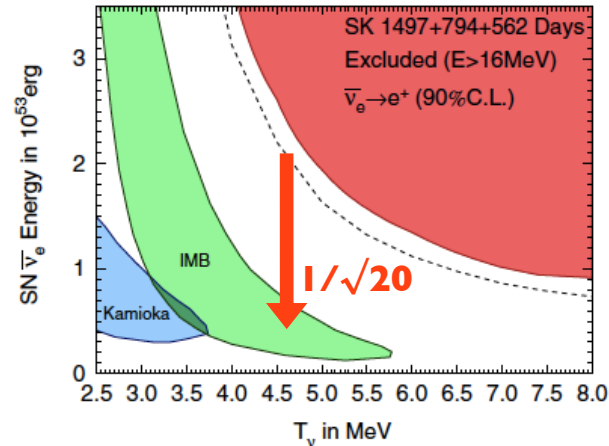
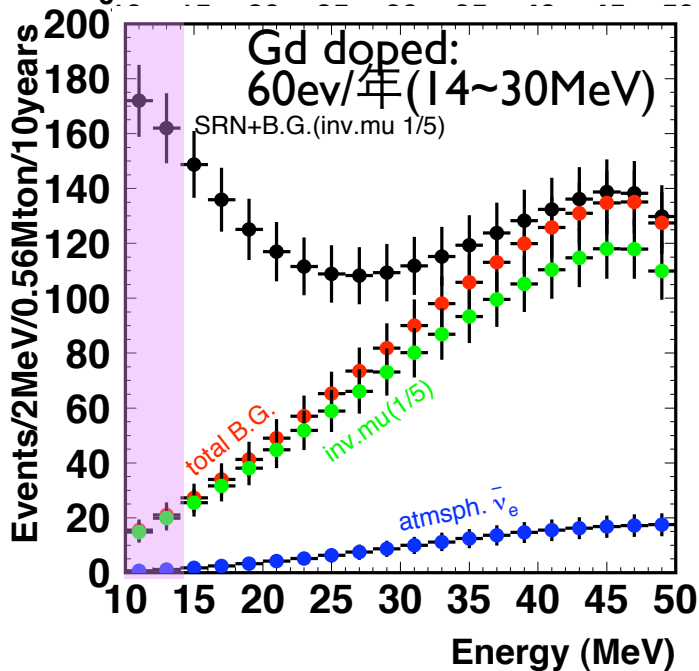
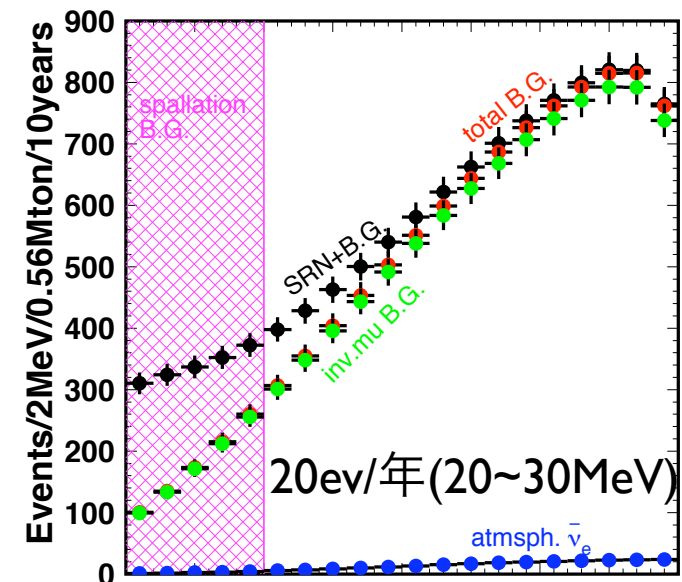
- 1 SN about every 10 years is expected within 2 Mpc
- $>50\%$ efficiency is estimated for required signal multiplicity of 3 for SN at 2 Mpc distance.
- Further study will be performed on E threshold and expected BG.

ν burst @ Milky way (10kpc)

- 20万 ν による詳細な情報.
 - 時刻毎の(ν luminosity, temperature, flavor)
 - 星崩壊過程 (モデル) の解明
 - 中性子化バーストから10msec内に20~56事象の期待値→中性子星誕生の瞬間を捉える
 - 開始時刻決定精度~1m秒→光、重力波との比較
 - ν の質量 (ν TOF) →0.3~1.3eV/c²
 - ν 質量階層性の解明



SN Relic ν (diffuse ν)

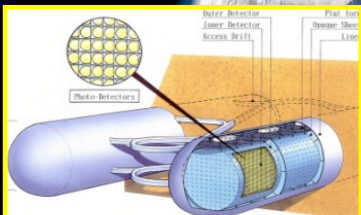


- SKの体積倍で決まるとすると感度は $1/\sqrt{20}$.
- SN burstと同様、モデルに制限を付ける。
- ガドリニウムを水中に溶かすことによりBG低減の可能性。SKでstudy中。

日米欧の計画

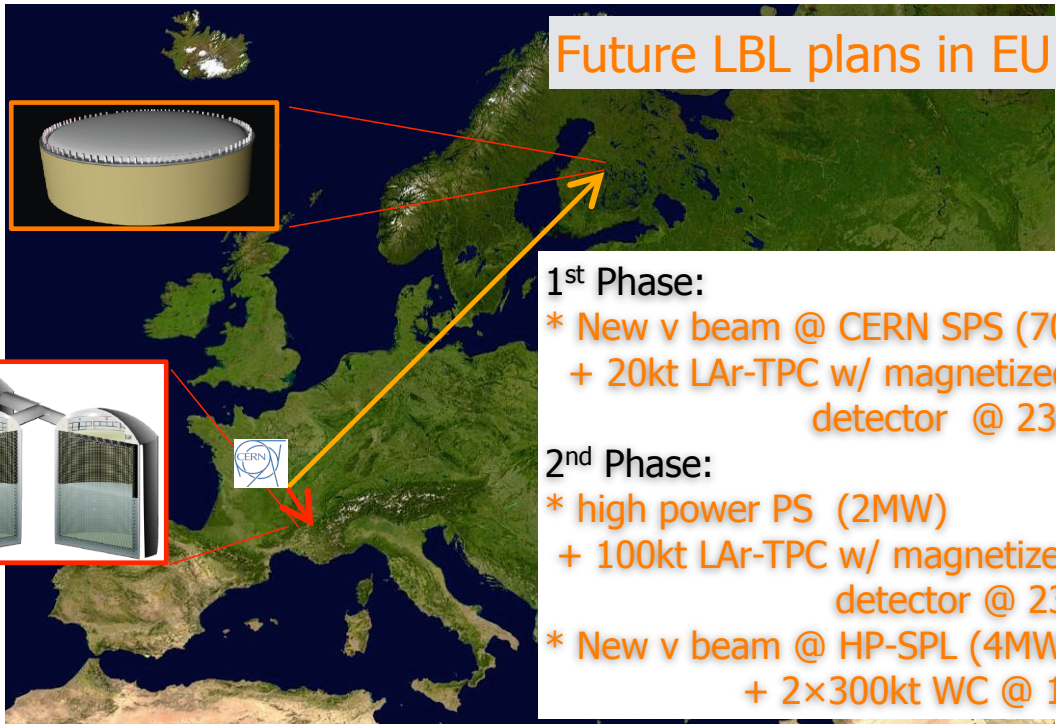
- The future experiments to measure CPV and MH conclusively are proposed.

Future LBL plan in JP



J-PARC+1Mt WC (Hyper-K)
@ L=295km OA=2.5deg

Future LBL plans in EU



1st Phase:
* New v beam @ CERN SPS (700kW)
+ 20kt LAr-TPC w/ magnetized iron detector @ 2300km

2nd Phase:
* high power PS (2MW)
+ 100kt LAr-TPC w/ magnetized iron detector @ 2300km
* New v beam @ HP-SPL (4MW)
+ 2×300kt WC @ 130km

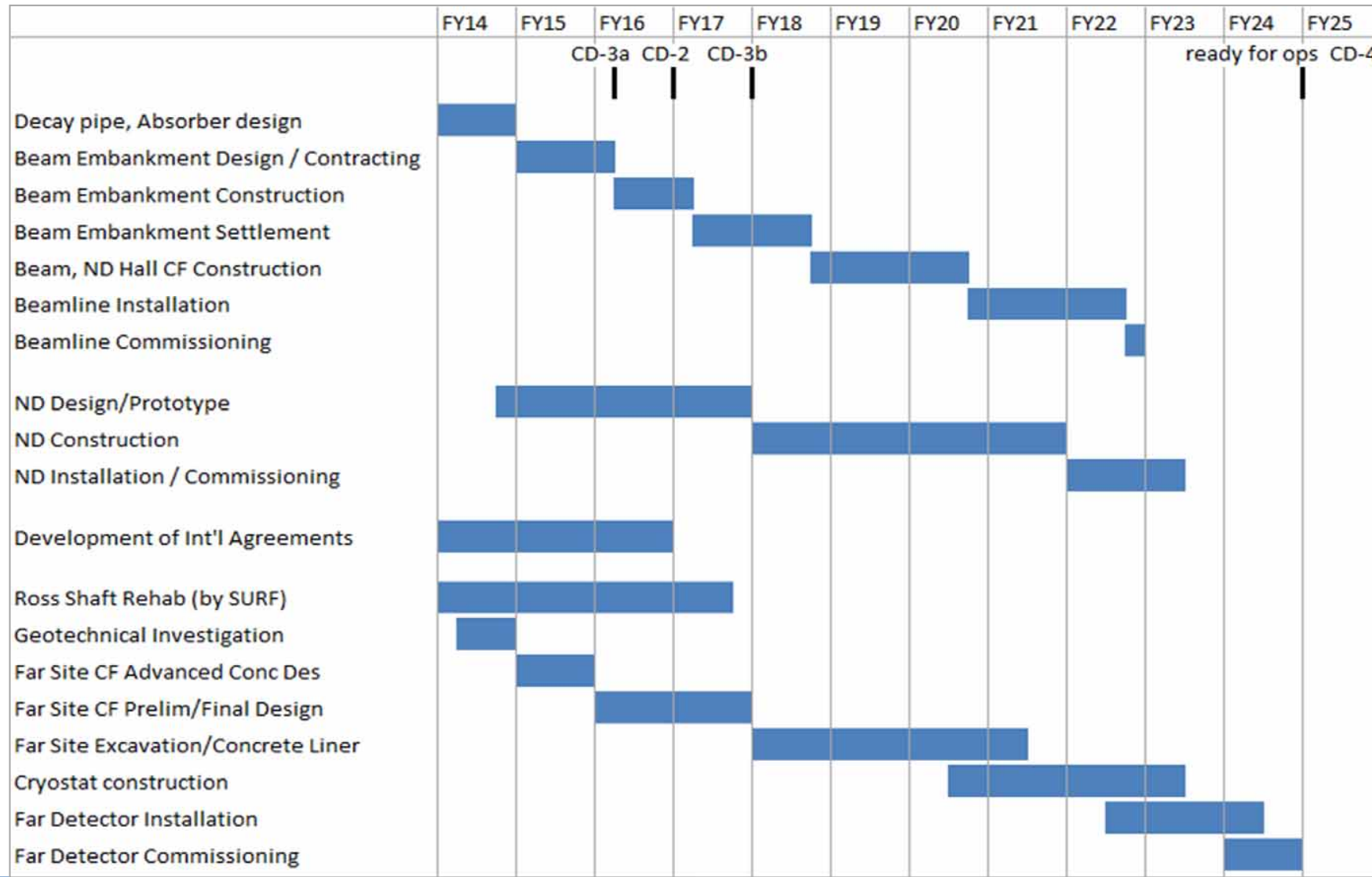
Future LBL plan in US



LBNE: New v beam facility for
FNAL-MI (700kW→1.2MW→2.3MW)
+ 10kt→34kt LAr @ 1300km

Plausible Schedule for International LBNE

Question 1: "a brief summary of ... a notional timeline..."



計画の緊急性

- T2Kによる電子ニュートリノ出現の発見
 - CPV測定の状態が整った
 - SK、T2Kから次期計画への継続性が不可欠
- 激しい国際競争 (LBNE, ...)
 - ニュートリノ物理で日本が引き続き世界をリードすべき
- 国際的にもHyper-Kの実現が期待されている

時期を逃さず早期実現を！

物理のまとめ

- ニュートリノ振動の全容解明
 - レプトンのCPの破れの発見、 δ 測定
 - 質量回想構造の決定
 - θ_{23} が最大混合か ($\theta_{23} < \pi/4$ or $=\pi/4$ or $>\pi/4$)
- 核子崩壊探索感度の飛躍的向上
 - 核子寿命で $10^{34}\sim 10^{35}$ 年
- 天体ニュートリノ天文学
 - 200 ν 's / day 太陽ニュートリノ
 - 時間変動?、昼夜変動 (物質効果)
 - 250,000 (50) 超新星爆発ニュートリノ @Galactic-center (Andromeda)
 - ~ 200 ν 's / 10 years (>20 MeV) 超新星背景 ν
 - 暗黒物質からの ν , 太陽フレアからの ν , 他

