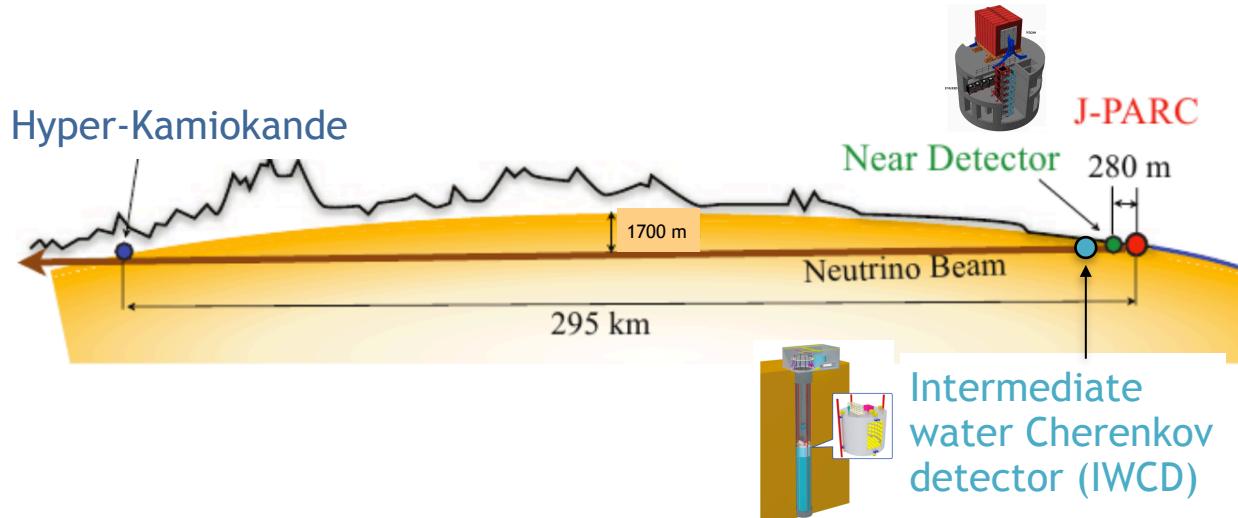
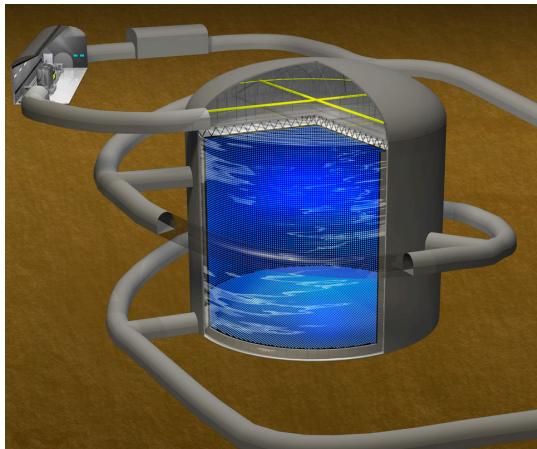
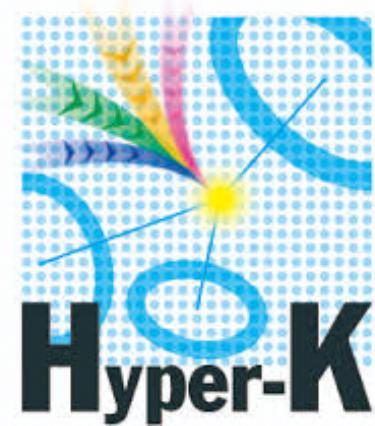
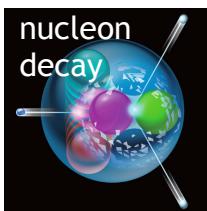
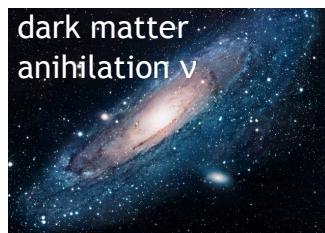
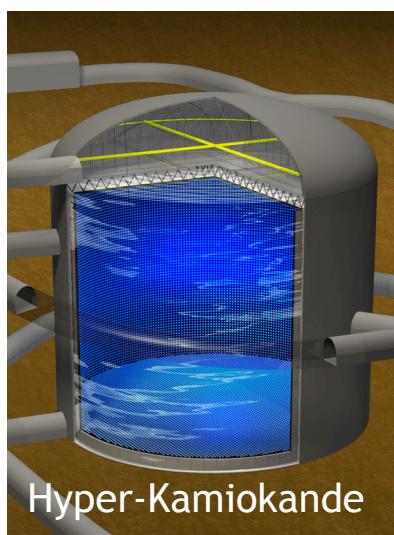
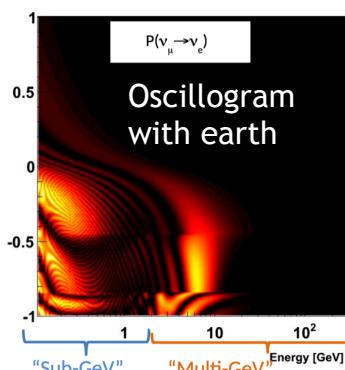
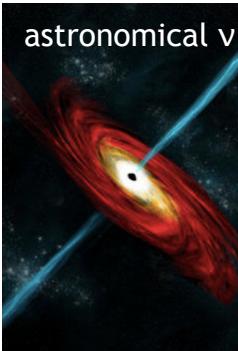
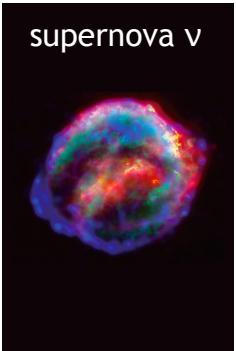
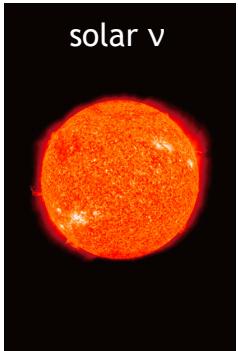
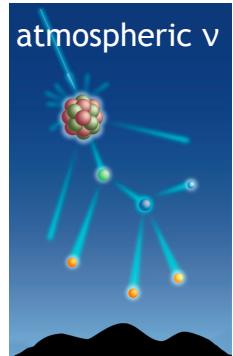


The Hyper-Kamiokande project

Akira Konaka (TRIUMF)
@NBI-2019
October 22, 2019



Hyper-Kamiokande Physics



- 188kton (fid.) water Cherenkov
 - 8 times larger than SuperK
 - 2.6 times intense J-PARC beam
- Physics goal
 - precision ν oscillation
 - long baseline neutrinos
 - atmospheric neutrinos
 - neutrino astronomy
 - supernova & solar neutrino
 - new physics
 - nucleon decays
 - dark matter
 - non-standard ν interaction (NSI)
- Construction to start in 2020
 - in the MEXT FY2020 budget

参考

世界の学術フロンティアを先導する大規模プロジェクトの推進

令和2年度要求・要望額 40,826百万円
(前年度予算額 34,382百万円)

目的

- 最先端の大型研究装置等により人類未踏の研究課題に挑み、**世界の学術研究を先導**。
- 国内外の優れた研究者を結集し、**国際的な研究拠点を形成**するとともに、国内外の研究機関に対し**研究活動の共通基盤を提供**。
- 日本学術会議において科学的観点から策定した**マスターフラン**を踏まえつつ、専門家等で構成される**文部科学省の審議会**において戦略性・緊急性等を加味し、**ロードマップを策定**。
- ロードマップの中から大規模学術フロンティア促進事業として実施するプロジェクトを選定の上、国立大学法人運営費交付金等の基盤的経費により戦略的・計画的に推進。原則、**10年間の年次計画を策定**し、審議会における**厳格な評価・進捗管理を実施**。
- 現行の13プロジェクトに加え、令和2年度より、ニュートリノ研究の次世代計画である**「ハイバーカミオカンデ計画」**に新たに参入。

参考

主な成果

- **ノーベル賞受賞につながる画期的研究成果**
(受賞者: H14小柴昌俊氏、H20小林誠氏、益川敏英氏、H27梶田隆章氏)
- **年間約1万人の共同研究者が集結し、国際共同研究を推進**。このうちの半数以上が**外国人研究者**、3割程度が**若手研究者**と割合が高い。

外国人研究者
6,026人
(56%)

若手研究者
3,084人
(29%)

共同研究者数 : 10,583人 (H29実績)
- 天文分野では、すばる望遠鏡、アルマ望遠鏡の**TOP10%論文割合**や**国際共著論文割合**は、分野全体と比較しても高い。

大規模学術フロンティア促進事業等の主な事業

大型電波望遠鏡「アルマ」による国際共同利用研究の推進
〔自然科学研究機構国立天文台〕

宇宙・銀河系・惑星系の誕生過程を解明するため、日米欧の国際協力により、南米チリのアタカマ高地（標高5,000m）に建設したアタカマ大型電波サブミリ波干渉計による国際共同利用研究を推進。2019年4月CMB18銀河の中心にある超巨大ブラックホールの「影」の撮影に世界で初めて成功した国際プロジェクトに参加し、高い感度の観測性能により、その成果に大きく貢献。

新しいステージに向けた学術情報ネットワーク(SINET)整備
〔情報・システム研究機構国立情報学研究所〕

国内の大学等を高速通信で接続ネットワークで結び、共同研究の基盤を整備。全国900以上の大学や研究機関、約300万人の研究者・学生が活用する我が国の教育研究活動に必須の学術情報基盤。

ハイバーカミオカンデ(HK)計画の推進
〔東京大学宇宙線研究所〕
〔高エネルギー加速器研究機構〕

ハイバーカミオカンデ (物理探査技術開発)
大型検出器 (直径45m、高さ60m)
→底面2面の光検出
コヒーレンス
新型光検出器 (WLS)
→底面2面の光検出
大容量電子加速器J-PARC (生物学実験)
日本が初めて開拓したニュートリノ研究の次世代計画として、超高感度光検出器を備えた総重量26万トンの大型検出器の建設及びJ-PARCの高度化により、ニュートリノの検出性能を著しく向上。素粒子物理学の大統一理論の鍵となる未発見の電子崩壊探索やCP対称性の破れなどのニュートリノ研究を通じ、新たな物理法則の発見、素粒子との関係の解明を目指す。ロードマップ2017実現計画。

<産業等への波及>

産業界と連携した最先端の研究装置開発により、イノベーションの創出にも貢献

- 【すばる望遠鏡】超高感度カメラ技術→医療用三次元カメラへの応用
- 【アルマ望遠鏡】加熱による毛髪のハリ・コシの低下が毛髪内の金属性関係を解明→墨鉛を毛髪に浸透させる新しいヘアケア技術の開発・商品化に成功

※ 大学共同利用機関・人材育成機関の総括表「InChart」(Web of Science)による
2013-2017年5月にかけての天文・宇宙科学分野における論文数・引用回数
分析 (2019年7月)。日本全体は、著作由来日本を用いた論文数。

ハイパーカミオカンデ(HK)計画の推進

[東京大学宇宙線研究所]

[高エネルギー加速器研究機構]



日本が切り拓いてきたニュートリノ研究の次世代
計画として、超高感度光検出器を備えた総重量26
万トンの大型検出器の建設及びJ-PARCの高度
化により、ニュートリノの検出性能を著しく向上、素
粒子物理学の大統一理論の謎となる未発見の
電子崩壊探索やCP対称性の破れなどのニュートリノ
研究を通じ、新たな物理法則の発見、素粒子と宇
宙の謎の解明を目指す。コードマップ2017実現手順

- Hyper-Kamiokande is on the MEXT budget
- “In addition to the ongoing 13 large-scale projects, the next-generation neutrino research project Hyper-Kamiokande, will be newly launched in FY2020”
 - This is the first official statement of MEXT to declare that they shall start the HK project.
- Next steps (for the entire FY2020 government budget)
 - Dec. 2019:
 - approval by the Ministry of finance and cabinet
 - Mar. 2020:
 - final approval by the Parliament

日本語の歴史的典籍の国際共同研究ネットワーク構築計画
(人間文化研究機構国文学研究資料館)

Japanese literature archive



大型光学赤外線望遠鏡「すばる」の共同利用研究
(自然科学研究機構国立天文台)

米国ハワイ、姿を探る。Subaru telescope
た頃の宇宙の



大型電波望遠鏡「ALMA」による国際共同利用研究の推進
(自然科学研究機構国立天文台)

日米欧3ヵ国により、ALMA telescope
遠鏡からなる「ALMA」



30m光学赤外線望遠鏡（TMT）計画の推進
(自然科学研究機構国立天文台)

日米加中日第2の地球30m telescope
建設し、太陽系外の



超高性能プラズマの定常運転の実証
(自然科学研究機構核融合科学研究所)

我が国独自実現と定常体系化を目指すHigh T/ρ plasma
度プラズマの学理の探求と



スーパーBファクターによる新しい物理法則の探求
(高エネルギー加速器研究機構)

加速器のビーム「暗黒物質前身となる」Super-KEKB
多数再現して「消えた反物質」理論法則の発見・解明を目指す。
「破れ」理論(2008年ノーベル物理学賞)を証す!



大強度陽子加速器施設（J-PARC）による物質・生命科学及び原子核・素粒子物理学研究の推進
(高エネルギー加速器研究機構)

日本原子力研究開発機構を運営。ニュートリノ研究を推進。J-PARC
大級のビーム強度を持つ陽子加速器施設で基礎研究から応用研究に至る幅広い



高輝度大型ハドロン衝突型加速器（HL-LHC）による素粒子実験
(高エネルギー加速器研究機構)

CERNが設置するLHCにおいて質量領域での新粒子の検出を目指す。日本はLHCにおける国際分担。

HL-LHC



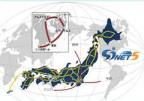
放射光施設による実験研究
(高エネルギー加速器研究機構)

学術研究、白川先生賞などPhoton factory
を目標。2014年ノーベル物理学賞



新しいステージに向けた学術情報ネットワーク（SINET）整備
(情報・システム研究機構国立情報学研究所)

国際連携Data network (Scinet)
を提



南極地域観測事業
(情報・システム研究機構国立極地研究所)

South pole environment



スーパーカミオカンデによるニュートリノ研究の推進
(東京大学宇宙線研究所)

超大型水槽(5万トン)によるその性質の解明を目指す。2015年
橋田博士はニードル賞を受賞。また、2002年小柴博士も同賞を受賞。

SuperK



大型低温重力波望遠鏡（KAGRA）計画
(東京大学宇宙線研究所)

一辺3kmのL字型の地下坑道で重力波を観測し、ブラックホールや未知の天体等の解明を目指す。国際ネットワークを構築し、重力波天文学の構築を目指す。

KAGRA



ハイバーカミオカンデ(HK)計画の推進
(東京大学宇宙線研究所、高エネルギー加速器研究機構)

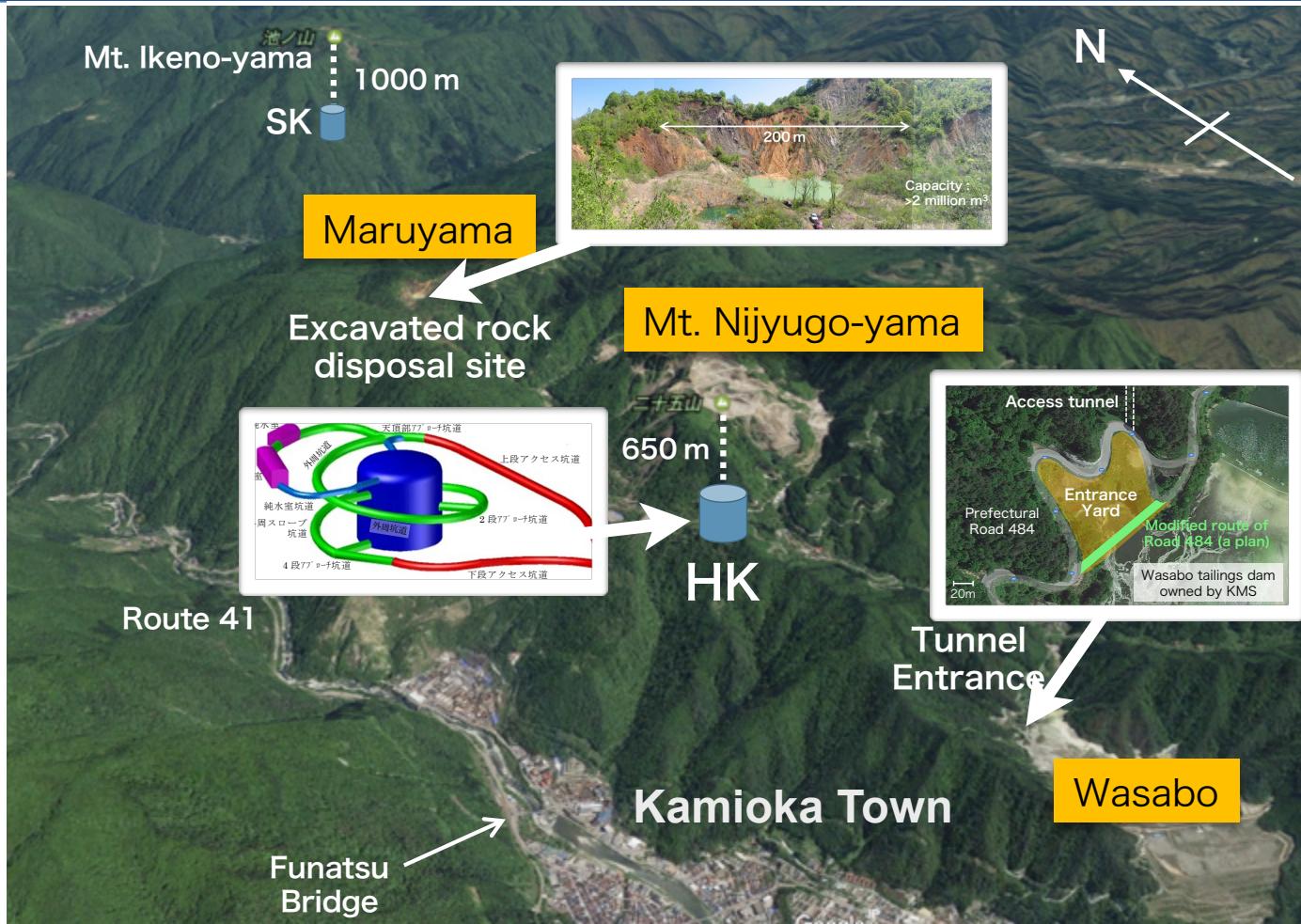
ニュートリノ検出器の性能を著しく向上。素粒子物理の基礎研究を進める。

HyperK (new)

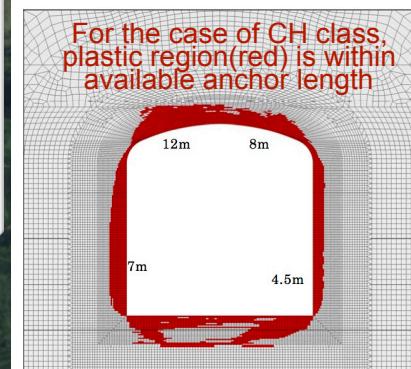


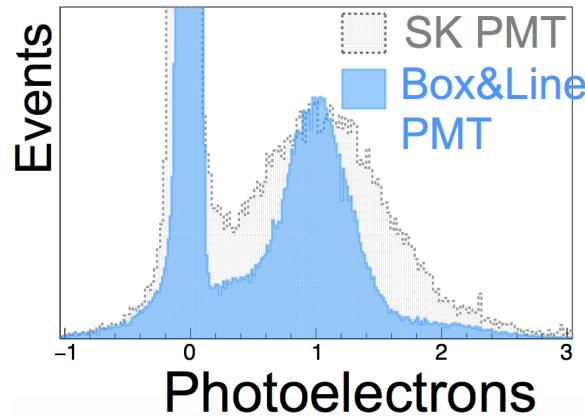
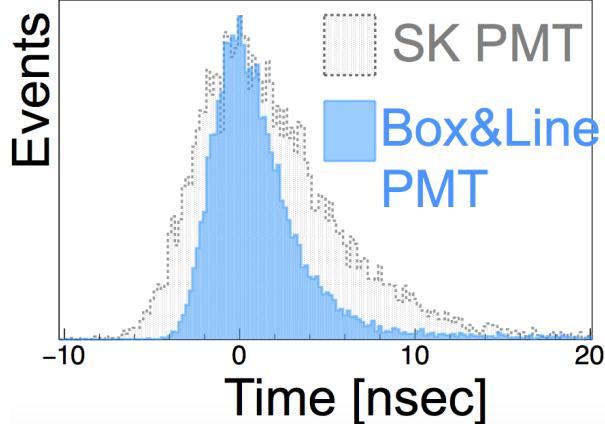
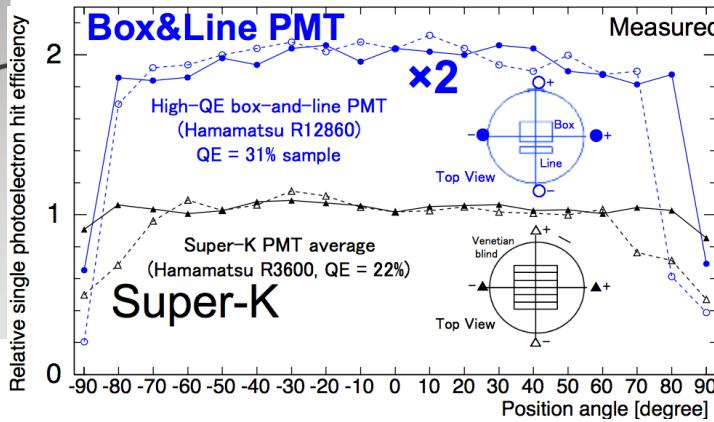
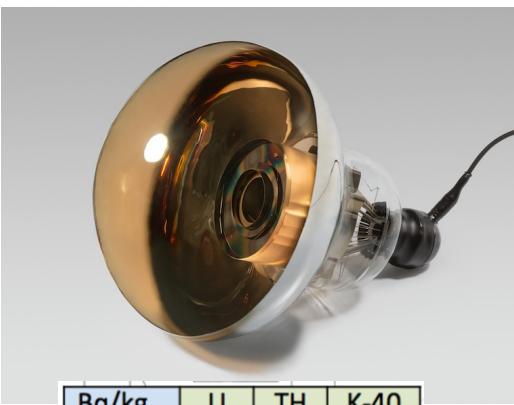
NEW

Hyper-Kamiokande site



Candidate site
with good rock
condition





- New Hamamatsu 20-inch Box&Line dynode PMT
 - x2 better photon detection
 - x2 better transit time spread
 - x2 better single photoelectron resolution
 - better pressure resistance for 80m water depth
 - Reduced dark rate
 - ~4KHz
- 100 prototypes in SK tank
 - mass production completed for JUNO

Large CP violation effect in neutrino oscillation possible

Unlike quark mixing (CKM),
lepton mixing (PMNS) is large:

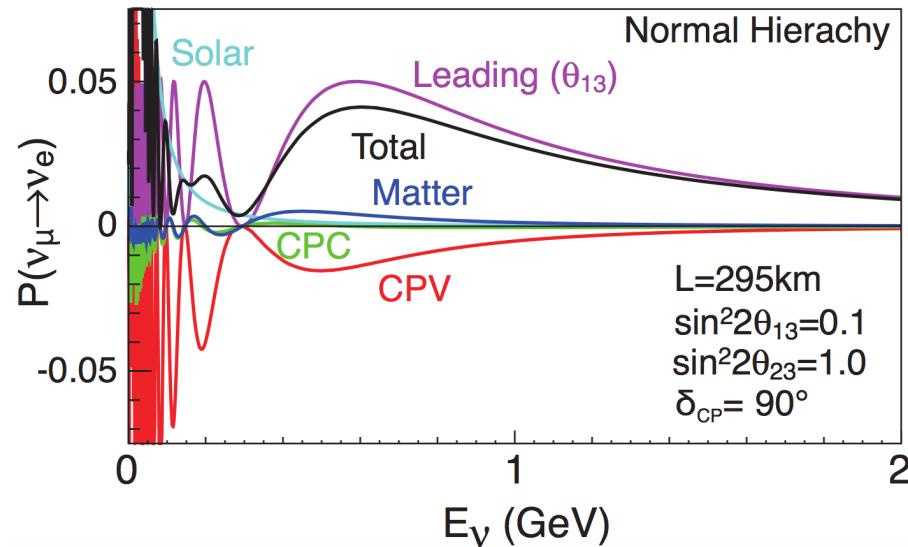
$$V_{\text{CKM}} \quad (\text{Quark mixing})$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0.2 & 0.001 \\ 0.2 & 1 & 0.01 \\ 0.001 & 0.01 & 1 \end{pmatrix}$$

$$V_{\text{PMNS}} \quad (\text{Lepton mixing})$$

$$\begin{pmatrix} 0.8 & 0.5 & 0.2 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}$$

→ Large CP violation effect possible



T2K/HyperKamiokande case:

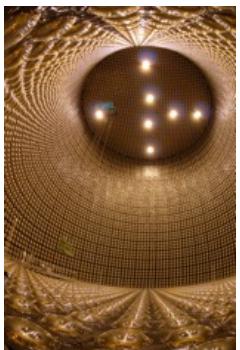
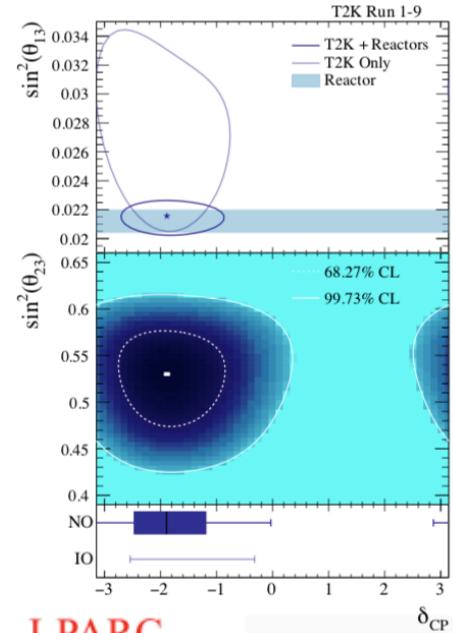
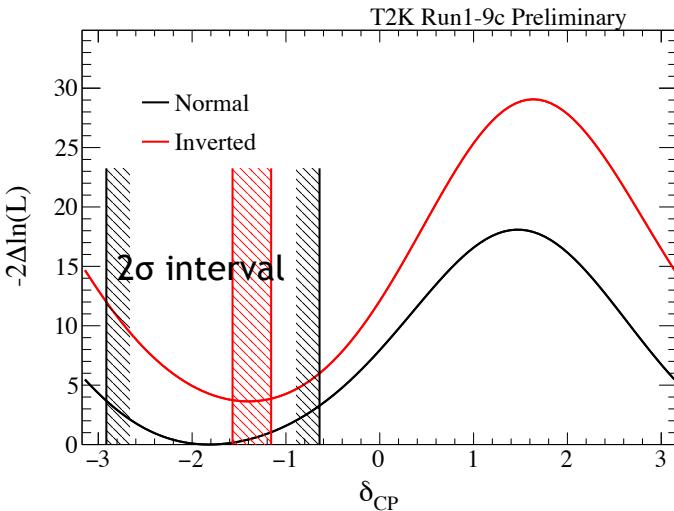
At the peak of
 $E_\nu=0.6\text{GeV}$

$$\frac{\text{Prob}(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - \text{Prob}(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)}{\text{Prob}(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) + \text{Prob}(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)} \simeq -0.28 \sin \delta_{CP} + 0.07$$

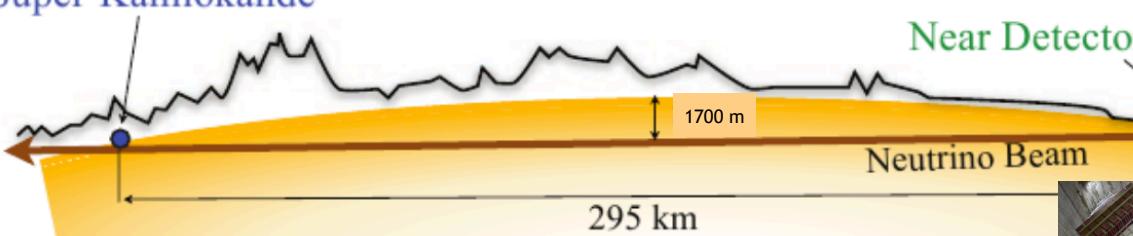
matter effect

Tokai-to-Kamioka (T2K) long baseline neutrino experiment

- 295km of neutrino travel
 - observed $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscil.
 - Disfavour CP conserving $\delta_{CP}=0,\pi$ at 2σ level
- Latest result:
 - arXiv:1910.03887



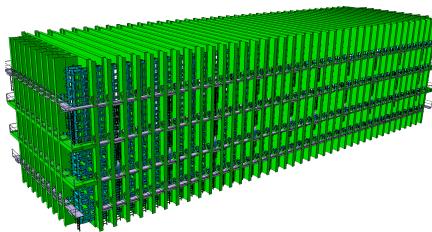
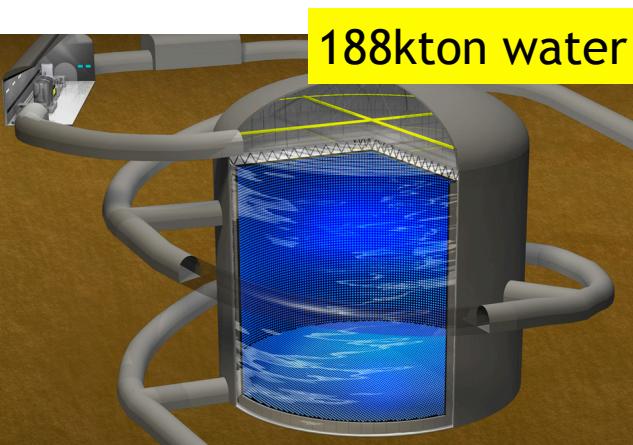
Super-Kamiokande



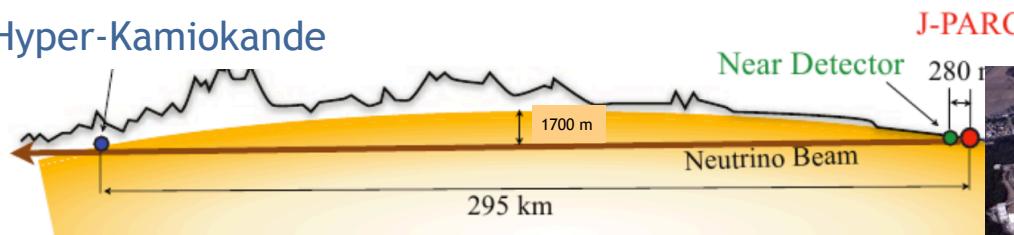
J-PARC



Future long baseline experiments for leptonic CP

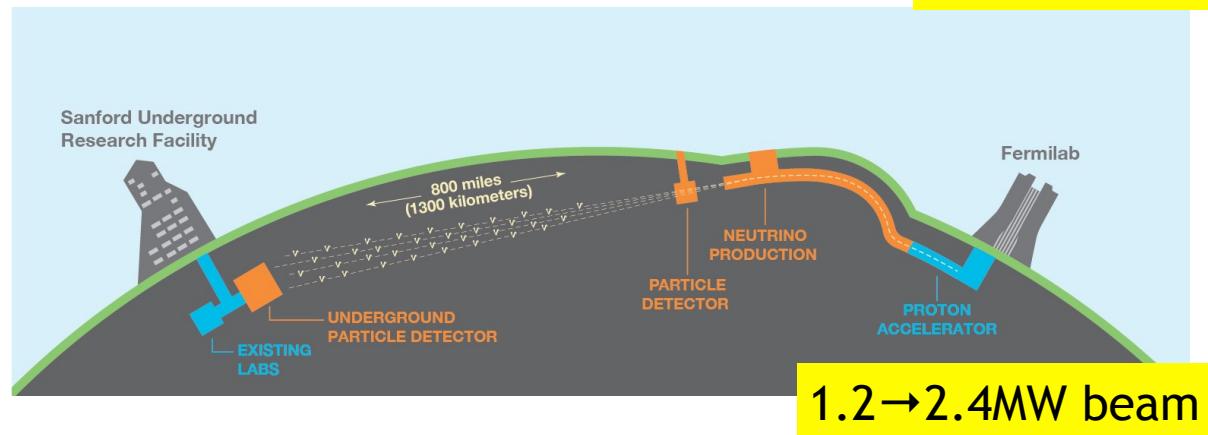


Hyper-Kamiokande

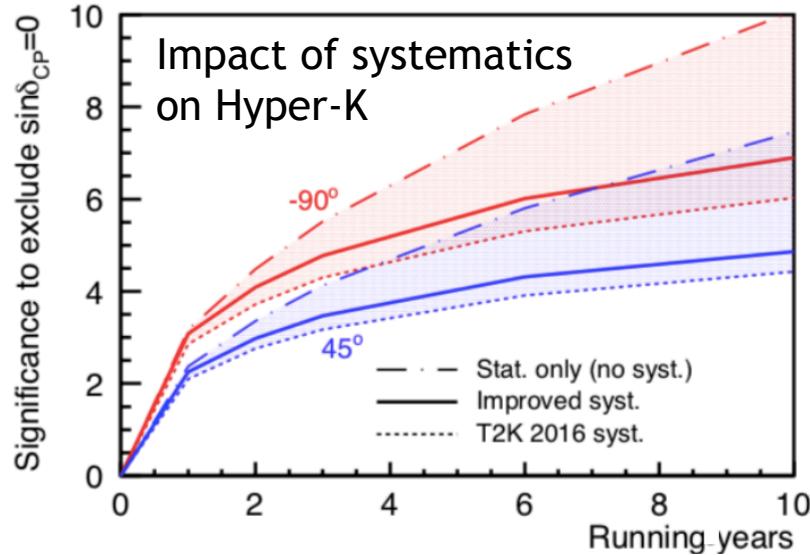
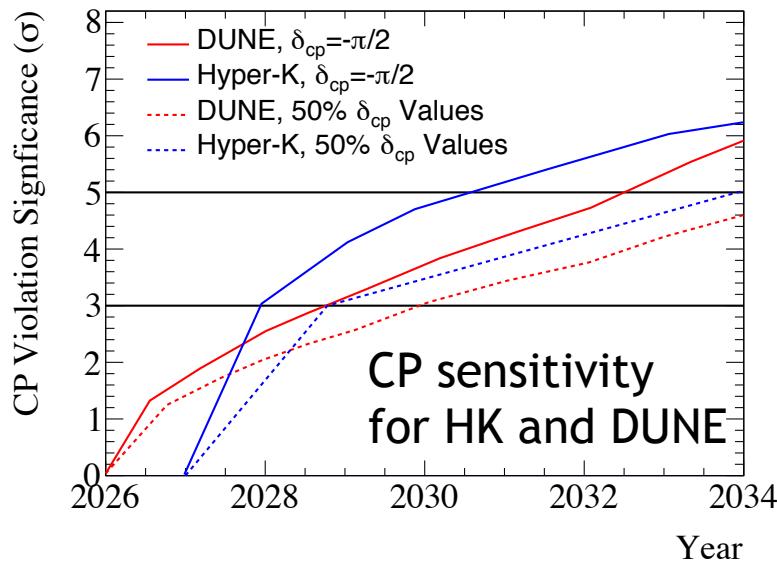


1.3MW beam

Sanford Underground Research Facility

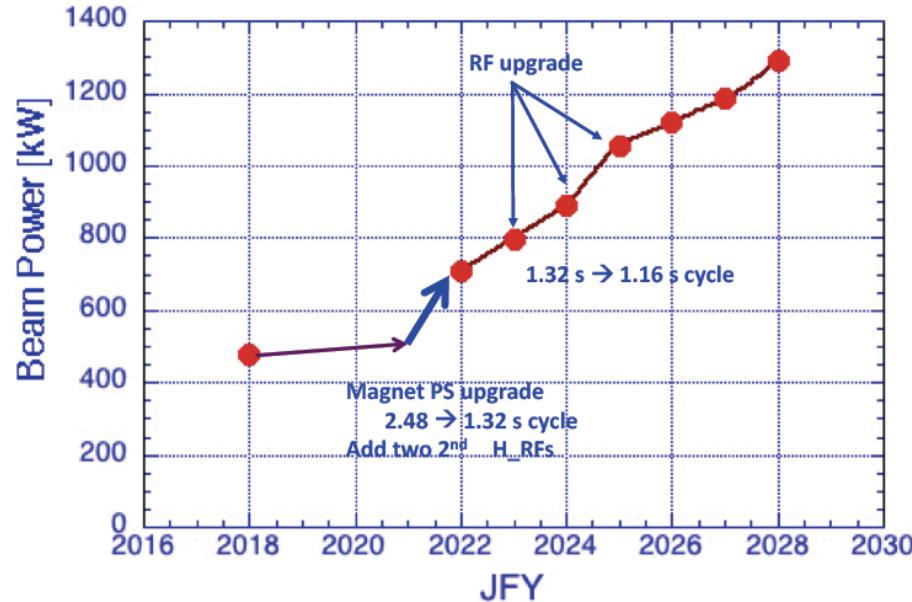


- Two experiments are in preparation: HyperK and DUNE



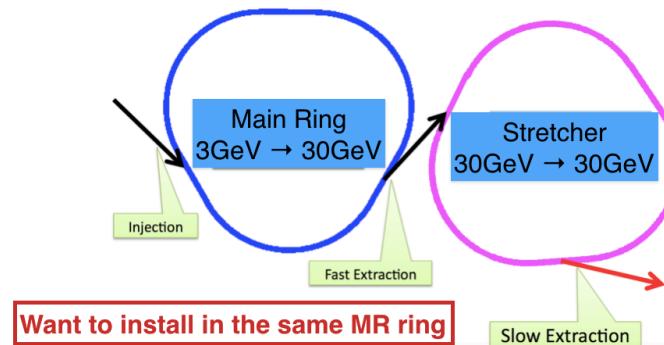
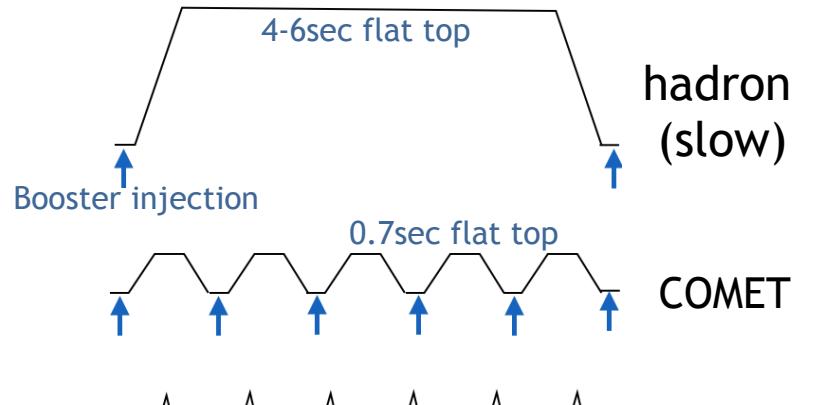
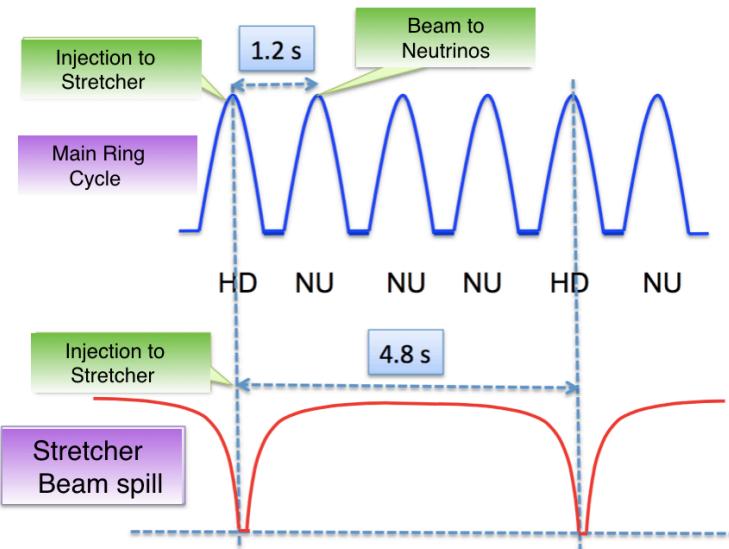
- HyperK and DUNE have basically the same sensitivities reaching 5σ for maximum CP viol.
 - Fiducial volume: HyperK 188kton DUNE 20-40kton
 - Beam power: 1.3MW 1.2-2.4MW
 - Running time: 10^7 sec/year 2×10^7 sec/year [slow/fast time sharing at J-PARC]
- Sensitivity will be determined by the control of systematic uncertainty and stable beam operation
 - NBI community takes essential roles on these points

- Beam power upgrade
 - by higher cycling rate
 - Power supply, RF upgrade
 - $2.48\text{sec} \rightarrow 1.16\text{sec/cycle}$
 - keep the same level of dynamic stress on beam window and target
- POT = power x time
 - Stable operation and monitoring
 - overcome radiation&heat challenges
 - important for systematic uncertainties
 - Flux systematics, NuPRISM method
 - Long running time
 - operation funds included in HK budget
 - competition with other J-PARC users



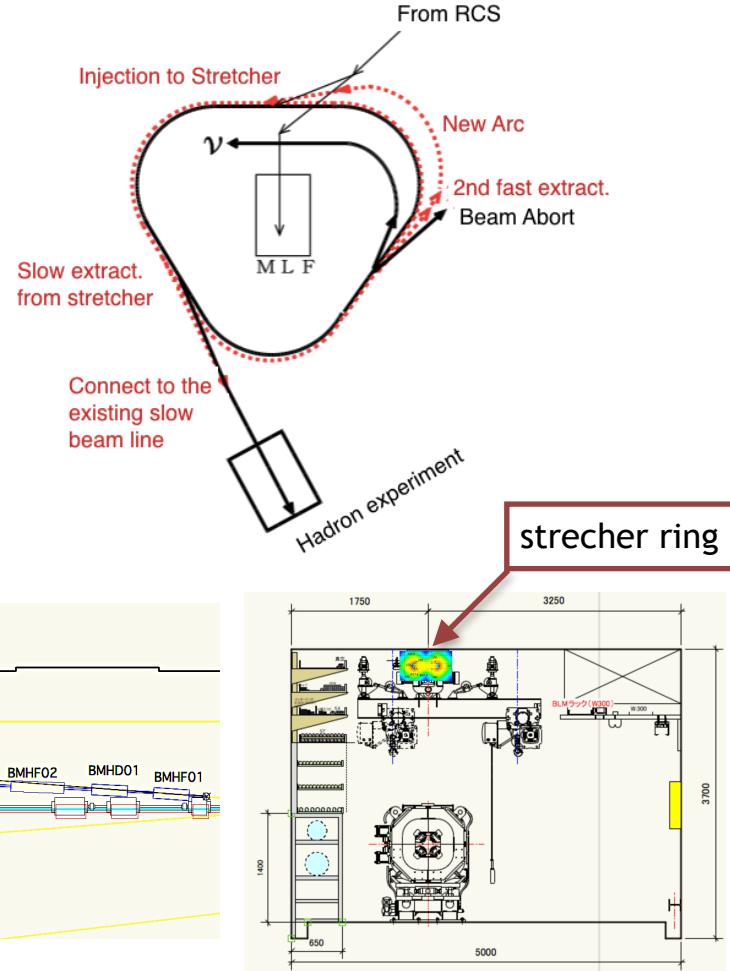
[side track] Simultaneous user running at J-PARC?

- Beam time is limited due to competing extractions
 - soon to become even harder with COMET
- Slow extraction from stretcher (storage) ring?
 - similar to the Fermilab recirculator ring
 - fast extraction during the slow extraction flat top

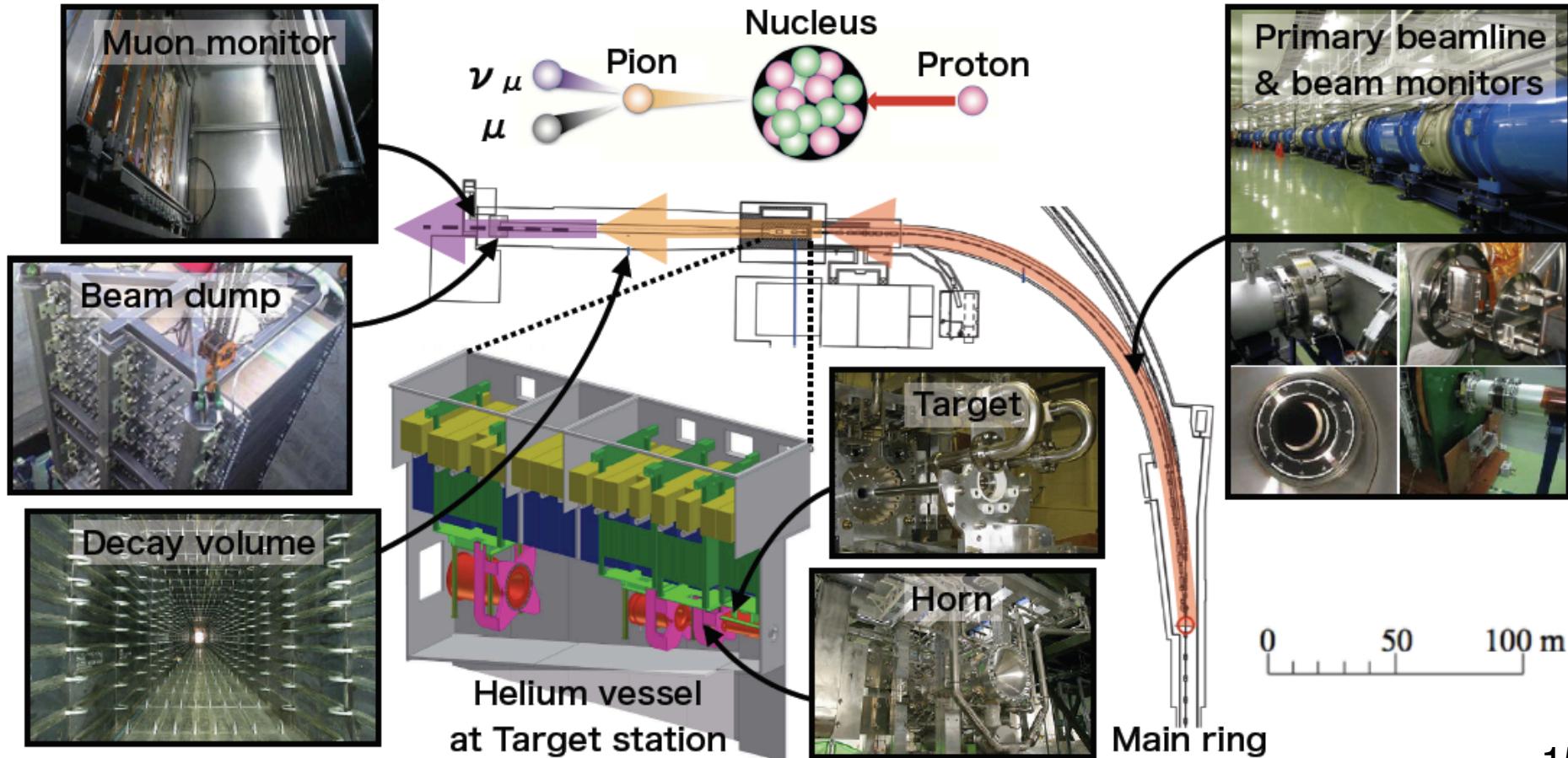


[side track] Conceptual design of a Stretcher ring inside MR

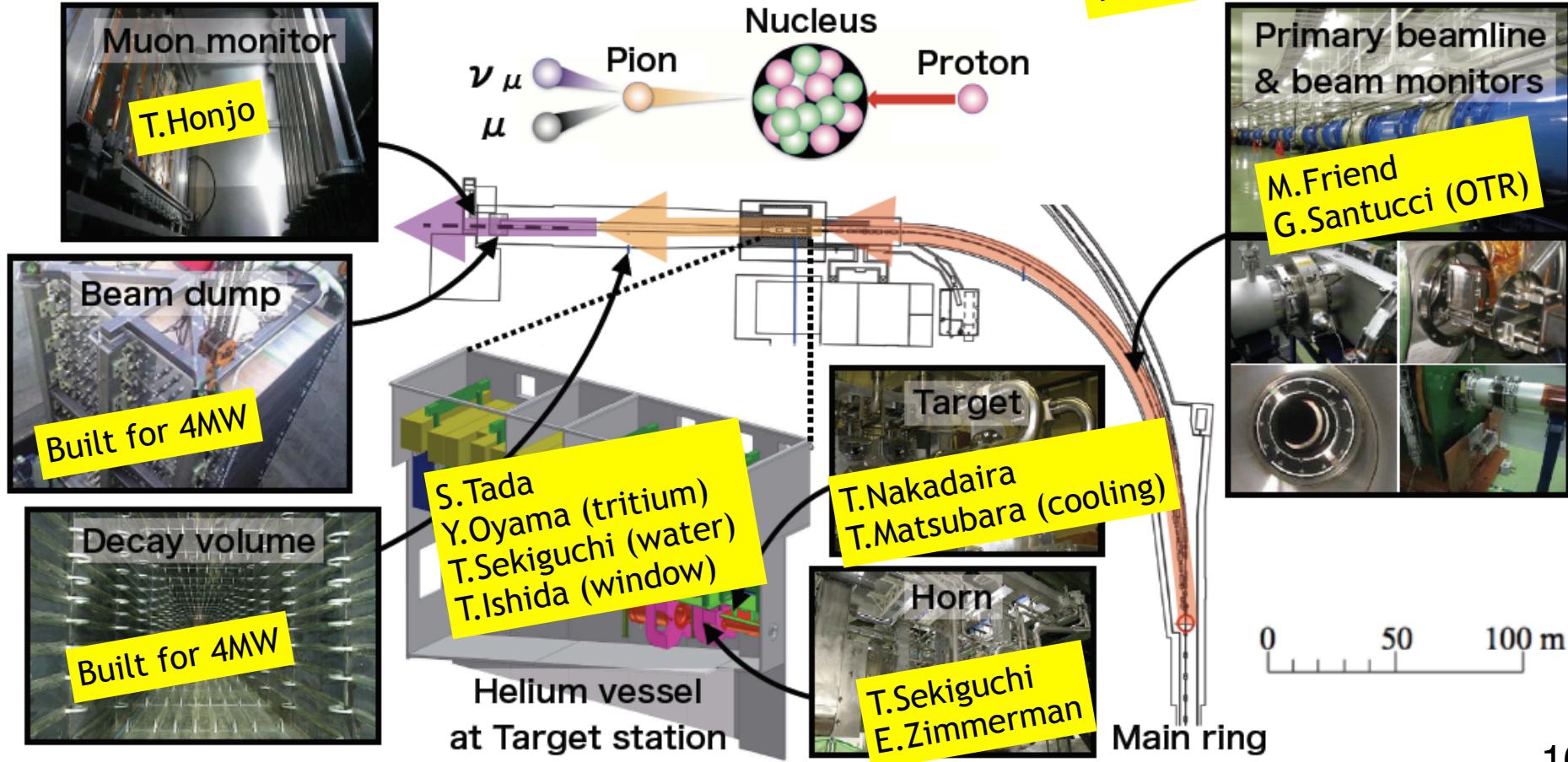
- Hybrid lattice with combined function magnet and superconducting magnet fits in the MR tunnel
 - Conceptual design only at this point
- Optics: extraction at fast/abort port
 - M. Tomizawa et. al. J.Phys.Conf.Ser. 1067 (2018) no.4, 042004
- Transmission line superconducting magnet
 - T. Ogitsu et. al., IEEE Trans.Appl.Supercond. 27 (2017) no.4, 4003705



Stable operation of the J-PARC neutrino beamline



Stable operation of the J-PARC neutrino beamline



HyperK near detector complex

1kton movable
Intermediate water
Cherenkov for HyperK

pC \rightarrow π, K, \dots

T2K near
detector

ND280

Ground Level

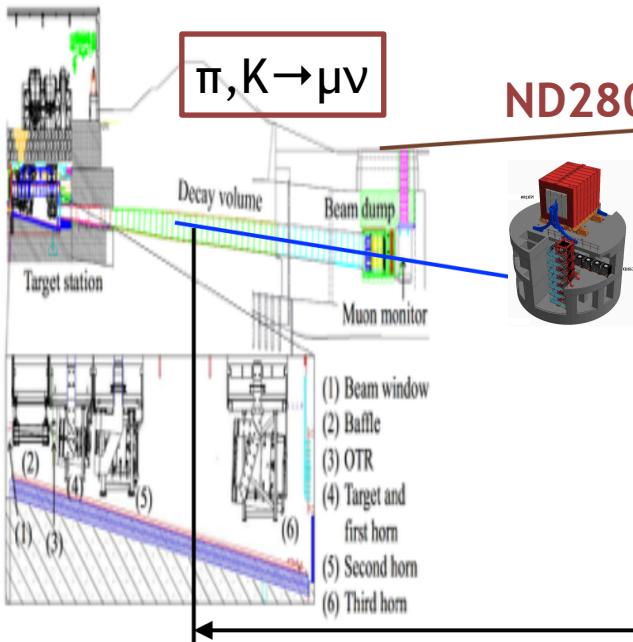
$\pi, K \rightarrow \mu\nu$

IWCD

50 m

~ 1 km

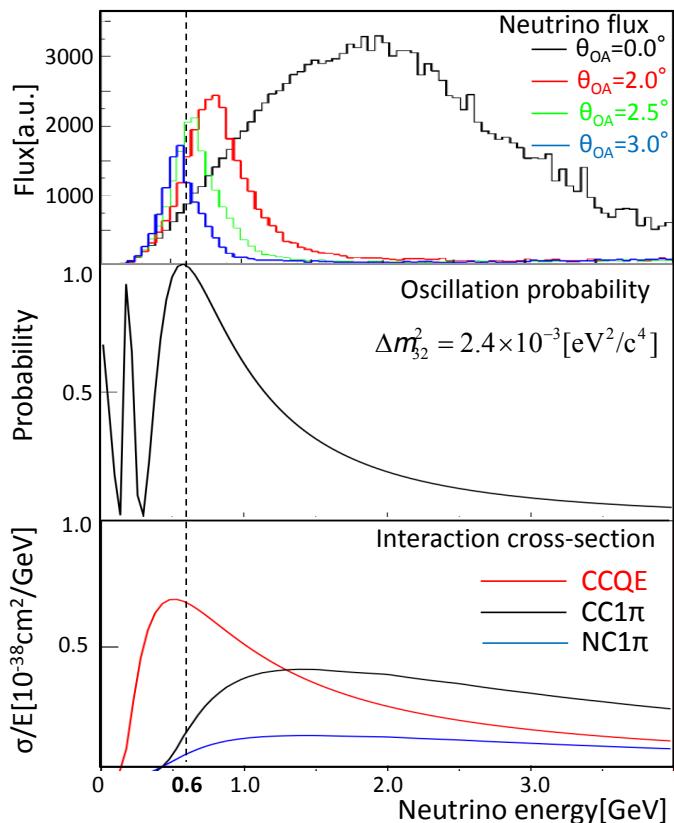
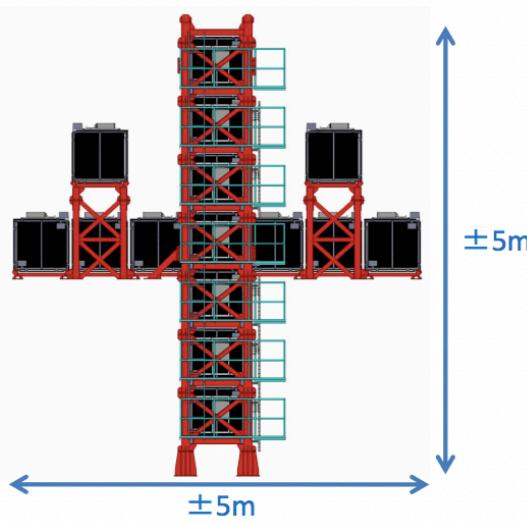
Mean beam direction



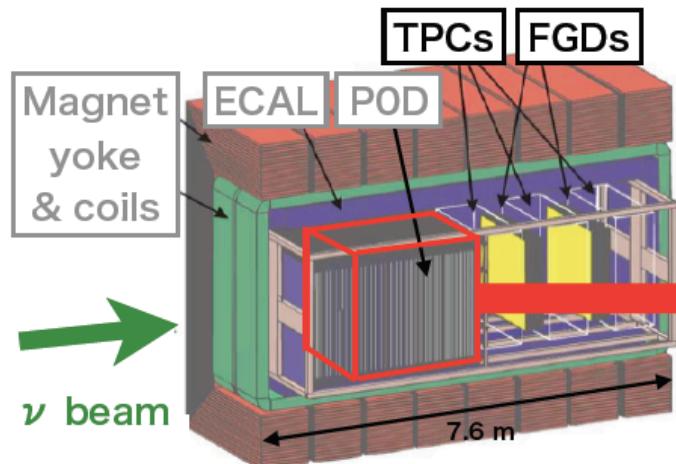
- HyperK uses 2.5° off-axis beam
 - narrow band beam at oscillation maximum
 - interaction dominated by CCQE
 - single water Cherenkov ring
 - kinematical neutrino energy reconstruction

- Very sensitive to beam direction
 - INGRID @ND280

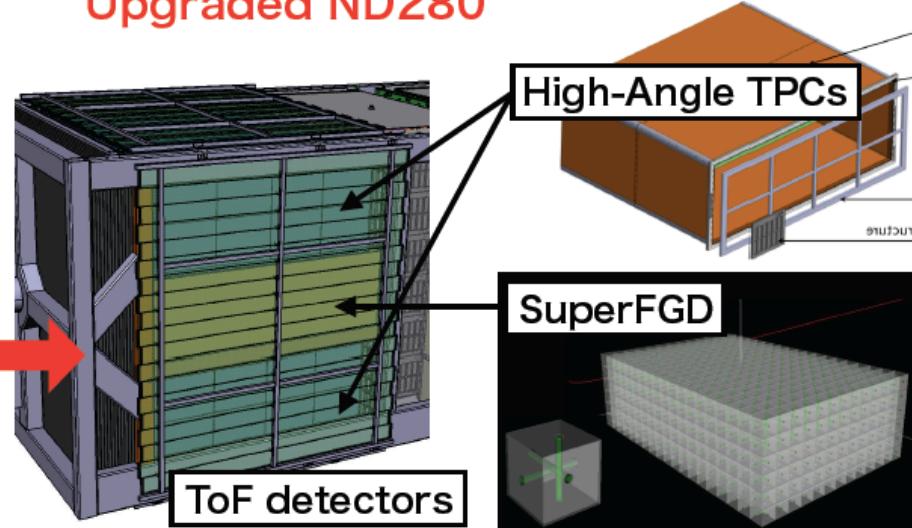
- Fe-Scintillator
- direction resolution of 0.3mrad ($\sim 2\text{MeV}$) achieved in T2K



Current ND280



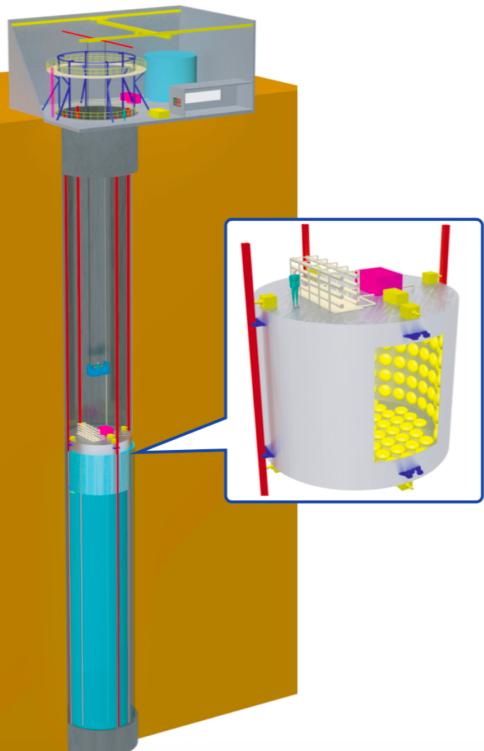
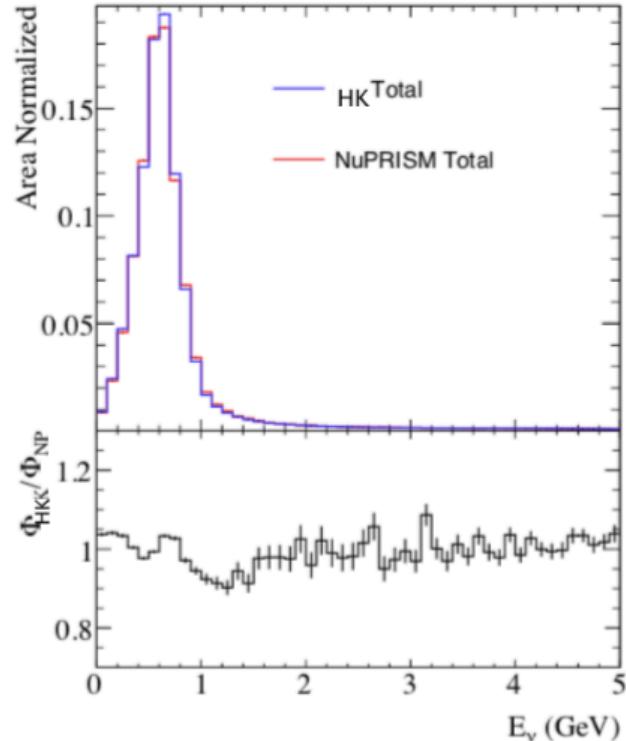
Upgraded ND280



- Monitors neutrino flux and cross section at 280m position
 - Magnetized detector is important to identify wrong sign ν
 - in particular important for anti-neutrino mode where cross section is 1/3
- Upgrade planned for finer granularity and wider solid angle

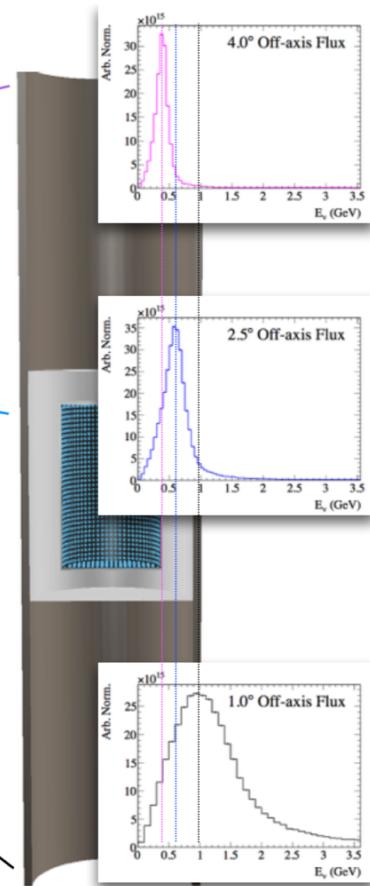
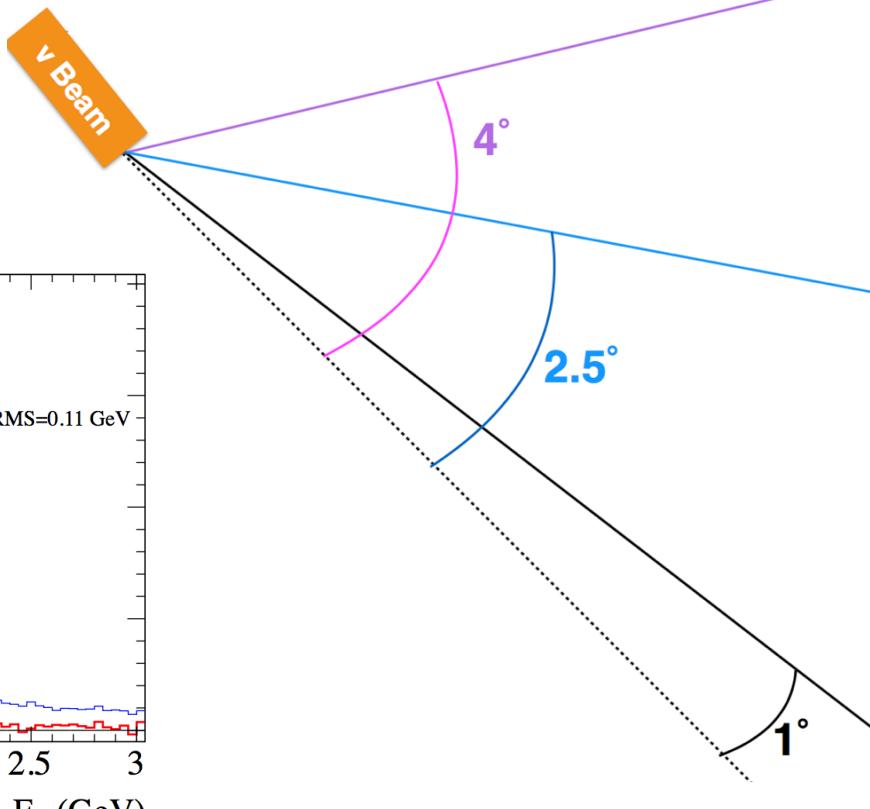
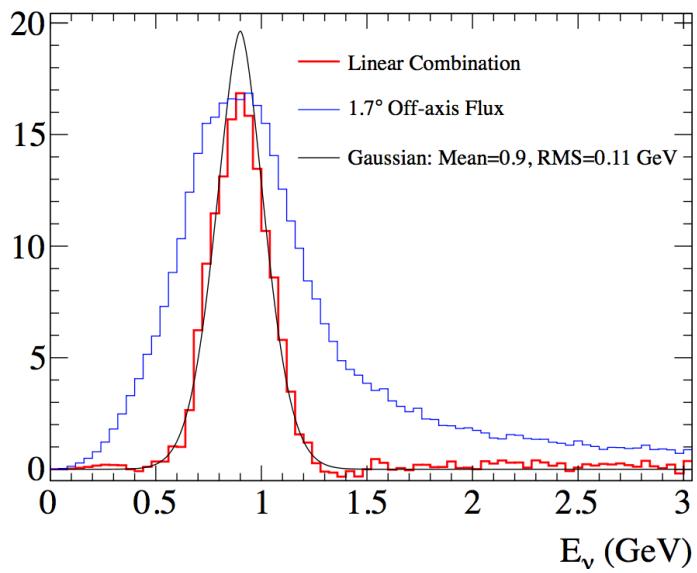
Intermediate Water Cherenkov Detector (IWCD)

- Water Cherenkov
 - same as HyperK
 - cross section
 - detection efficiency
- ~1km away from TG
 - point source ($L_\pi \sim 50\text{m}$)
 - same flux shape for IWCD and HyperK
- NuPRISM method
 - sample flux at different off-axis
 - match the flux between near & far
- ν_e cross section study

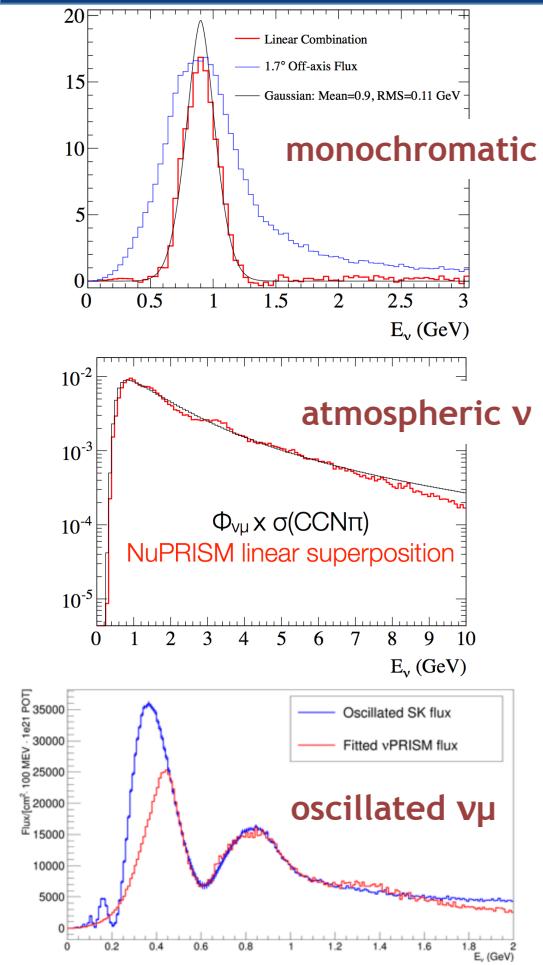


Linear combination
of events at different
off-axis position:

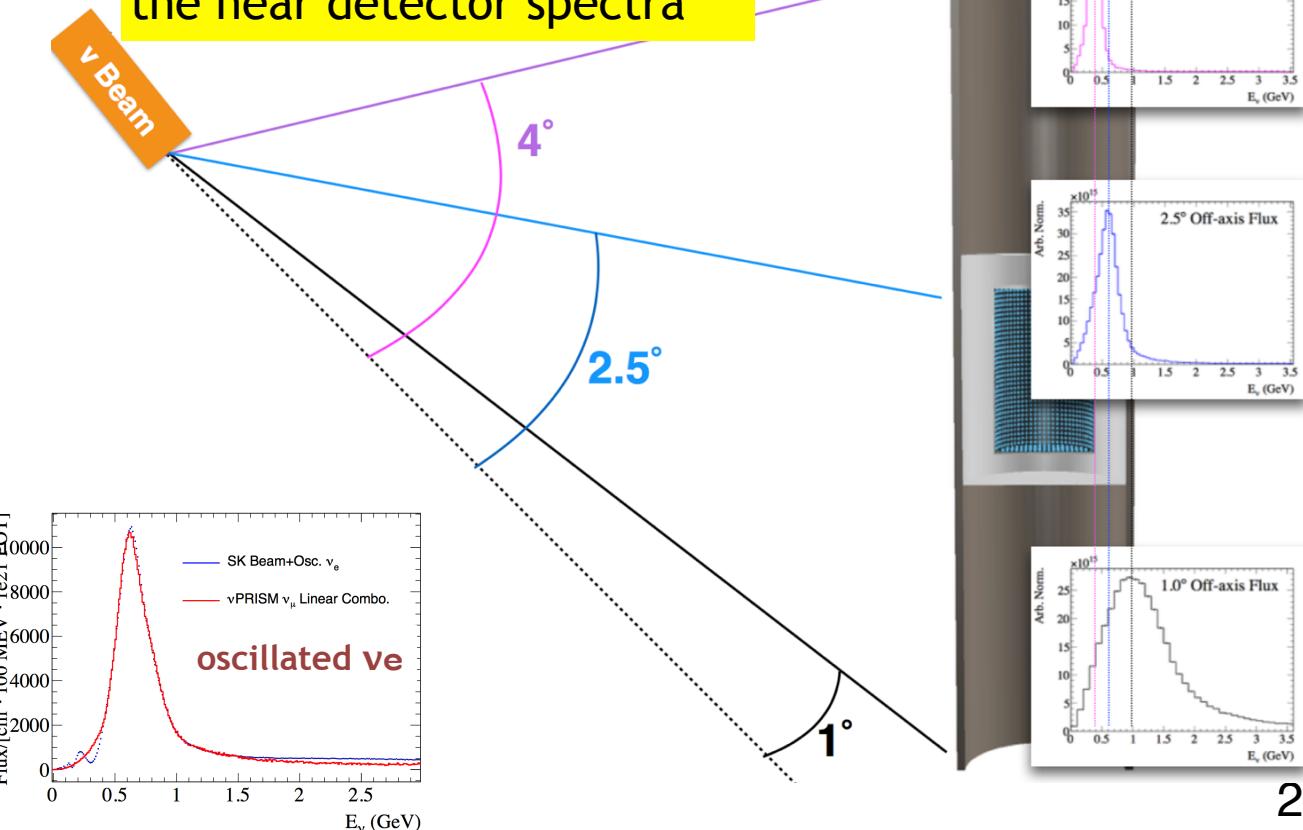
→ Monochromatic
 ν beam response



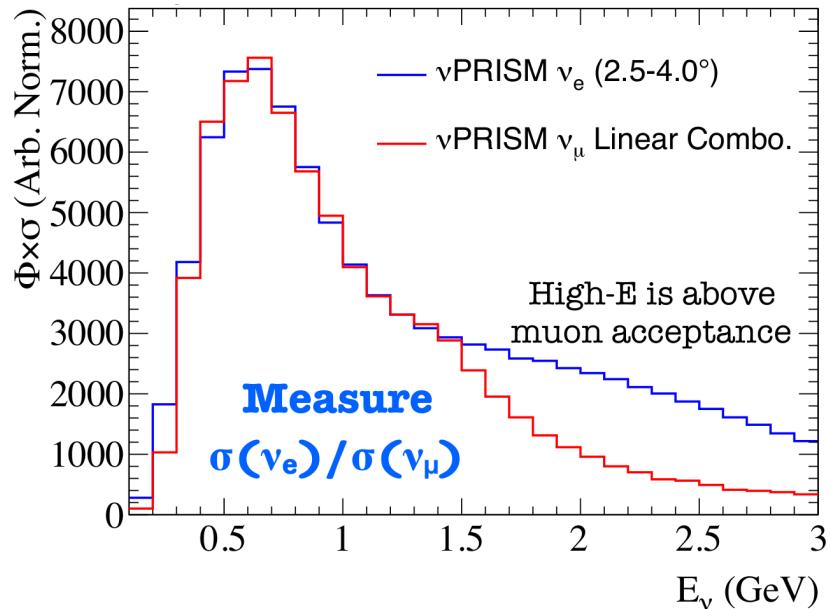
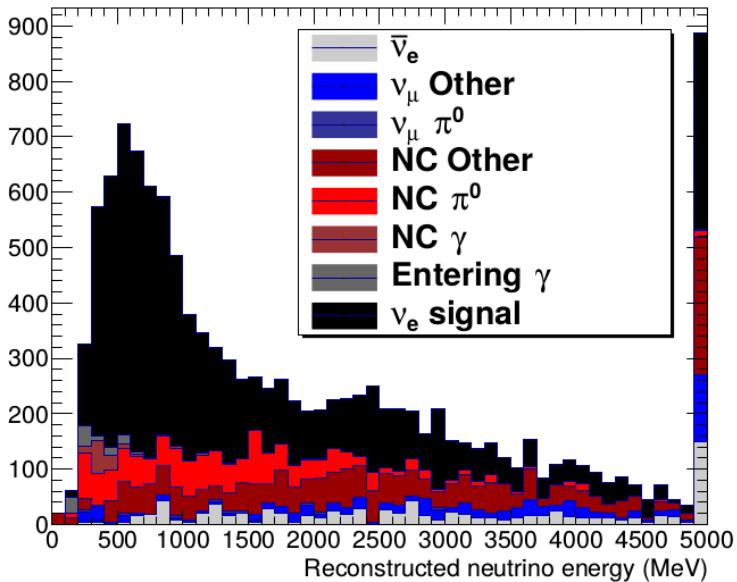
IWCD (NuPRISM) linear combination



match the far spectrum
with a linear combination of
the near detector spectra



Selected 1-ring e-like events



- Active outer water veto suppresses γ backgrounds
- Match the IWCD ν_e flux by IWCD ν_μ flux linear combination
 - cancelling the flux systematics to achieve precision measurement
 - precisely test the difference in the kinematical phase space

- Diverse physics program of HyperK
 - Precision neutrino oscillation; CP violation, mass hierarchy
 - Neutrino astronomy; exploding stars, sun
 - Search for new physics; nucleon decay, dark matter, non-standard ν interaction
- HyperK will be x20 more sensitive on CP than T2K
 - x8 from HyperK detector and x2.6 ($0.5\text{MW} \rightarrow 1.3\text{MW}$) from the beam
- High power and long stable beam operation is essential for CP study
 - Radiation and heat challenges to be overcome
 - Stable beam monitoring and operation to complement the suite of neutrino monitors
 - INGRID to monitor the beam direction
 - ND280 to monitor the wrong sign backgrounds
 - IWCD to monitor the neutrino event rate and ν_e cross section
- Hyper-K is on the FY2020 MEXT budget
 - “Hyper-Kamiokande will be newly launched in FY2020”

Summary of systematics requirements and sensitivities

Systematic Source	Required Precision	For Which Measurement	Detector	Achievable Precision
$\sigma(v_e)/\sigma(v_\mu)$	3-5%	CP Violation, δ_{cp} precision at $\sin(\delta_{cp}) \sim 0$, θ_{23} precision at $\sin(\theta_{23}) \sim 0.5$	IWCD	3.5-5%
$\sigma(\bar{v}_e)/\sigma(\bar{v}_\mu)$	3-5%	CP Violation, δ_{cp} precision at $\sin(\delta_{cp}) \sim 0$, θ_{23} precision at $\sin(\theta_{23}) \sim 0.5$	IWCD	4-7%
Wrong-sign background normalization	9%	CP Violation, δ_{cp} precision at $\sin(\delta_{cp}) \sim 0$	ND280	TBD (expect <9%)
Intrinsic v_e, \bar{v}_e and NC backgrounds	3-4%	CP Violation, δ_{cp} precision at $\sin(\delta_{cp}) \sim 0$	IWCD	2.3% (neutrino)
Normalization of non-QE with $E_v > 0.7$ GeV	5%	θ_{23} precision at $\sin(\theta_{23}) \neq 0.5$	IWCD	5% (neutrino)
Normalization of non-QE with all energies	5%	δ_{cp} precision at $\sin(\delta_{cp}) \sim 0$ Δm^2_{32} precision	IWCD, ND280*	5% (IWCD neutrino) <4% (N280 neutrino) <7% (ND280 antineutrino)