



**Hyper-Kamiokande**

# Comité de suivi de thèse 3ème année

Préparation de l'expérience Hyper-Kamiokande



# Contents



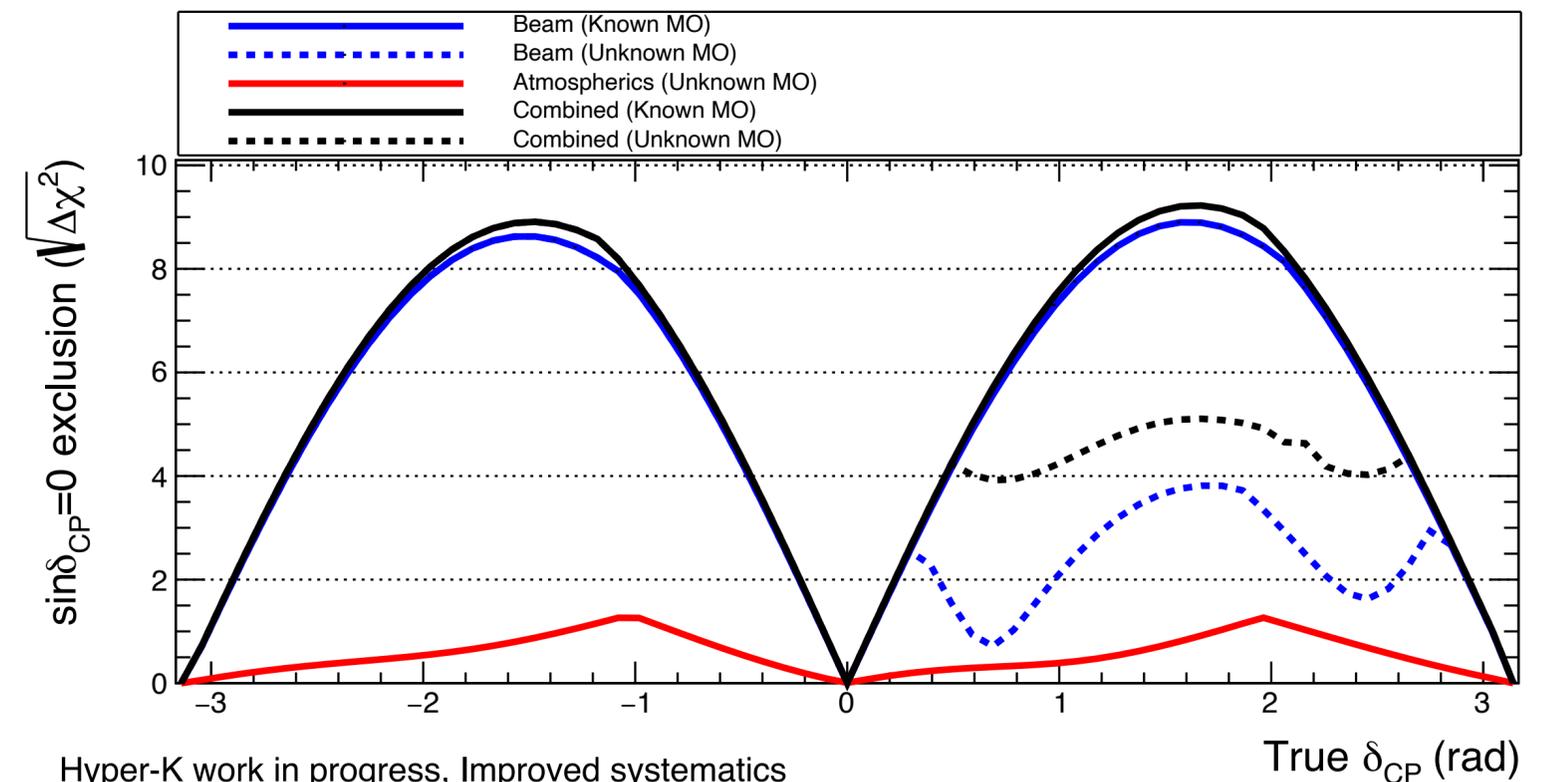
**Hyper-Kamiokande**

- Études de sensibilité pour HK
- Synchronisation de HK avec J-PARC et l'UTC
- Calibration et analyse des données de NA61/SHINE sur la cible réplique de T2K
- Présentations et conférences
- Articles
- Points de thèse

# Études de sensibilité pour HK

# Études de sensibilité pour HK

- Un papier a été écrit et revu par la collaboration
- Il devrait être envoyé à EPJC très prochainement
- Ajout des échantillons de neutrinos atmosphériques: étude de la dégénérescence entre la violation CP et la hiérarchie de masse
- Anna (stagiaire) va participer à ce travail



Hyper-K work in progress, Improved systematics  
True Normal Ordering, 10 years ( $2.7 \times 10^{22}$  POT 1:3  $\nu\bar{\nu}$ )  
 $\sin^2\theta_{13}=0.0218\pm 0.0007$ ,  $\sin^2\theta_{23}=0.528$ ,  $\Delta m_{32}^2=2.509\times 10^{-3}\text{eV}^2/c^4$

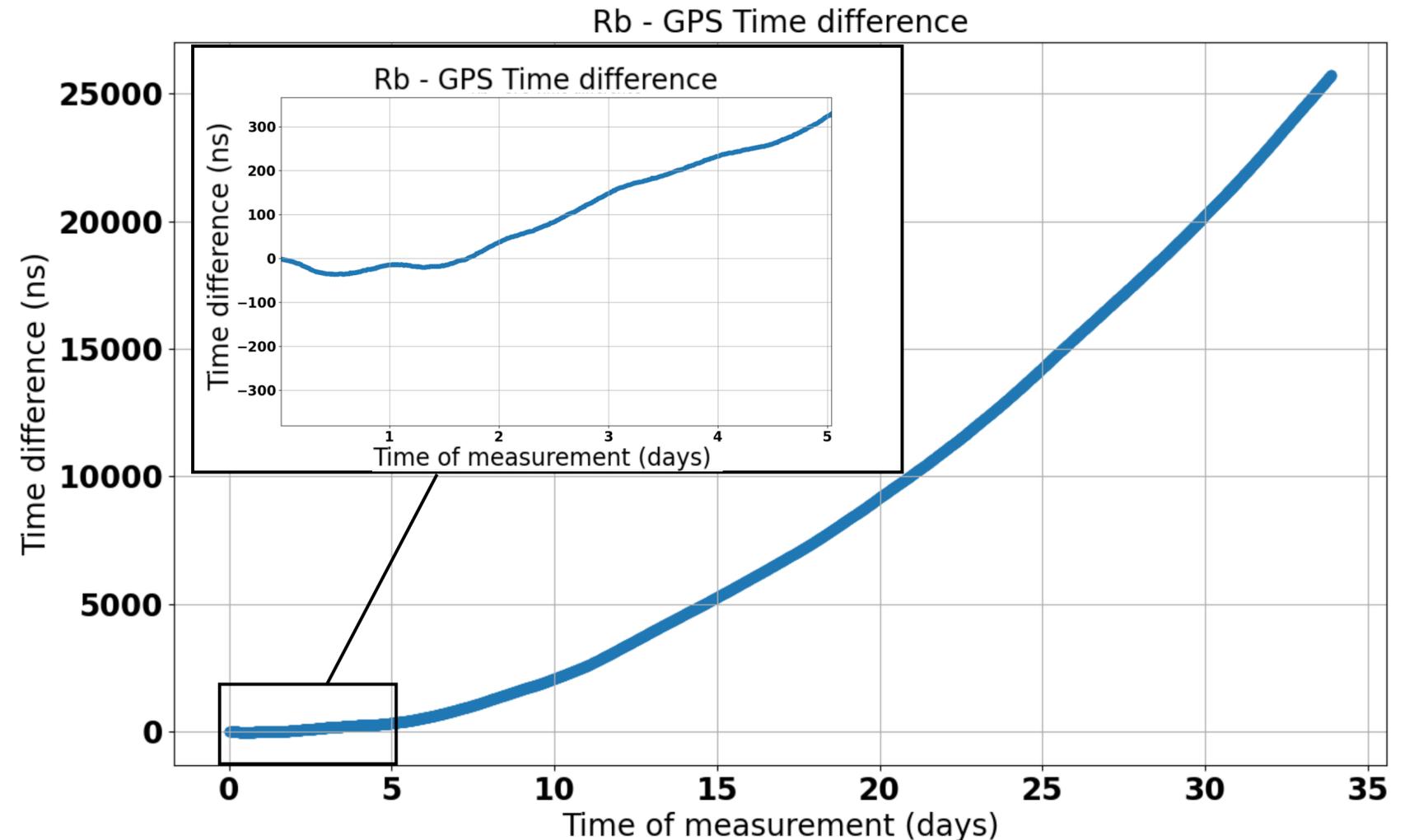
# Synchronisation de HK avec J- PARC et l'UTC

# Génération du temps dans HK

## Test de la correction pour la synchronisation avec le GPS

2 mesures simultanées de ~30 jours en juillet 2024:

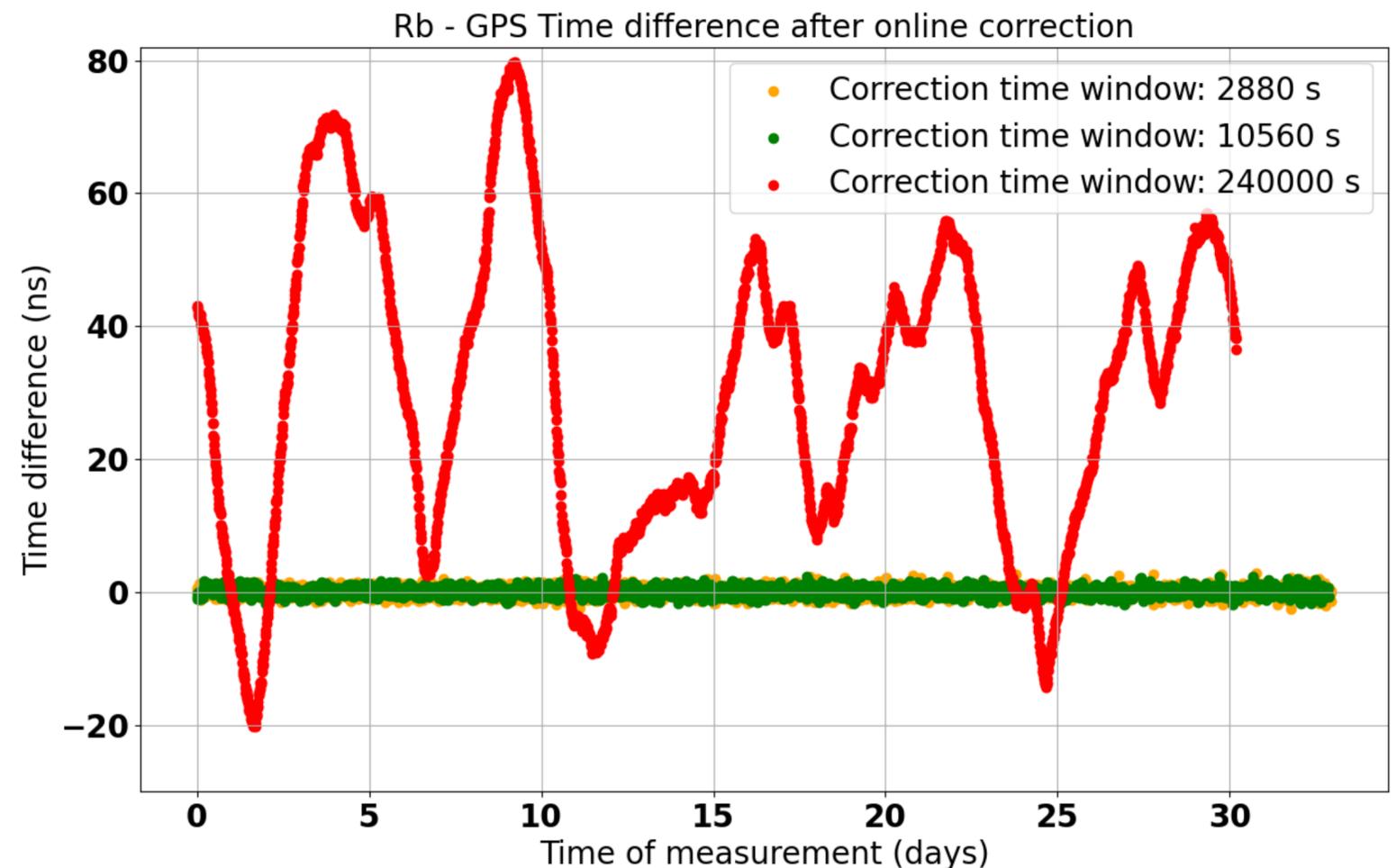
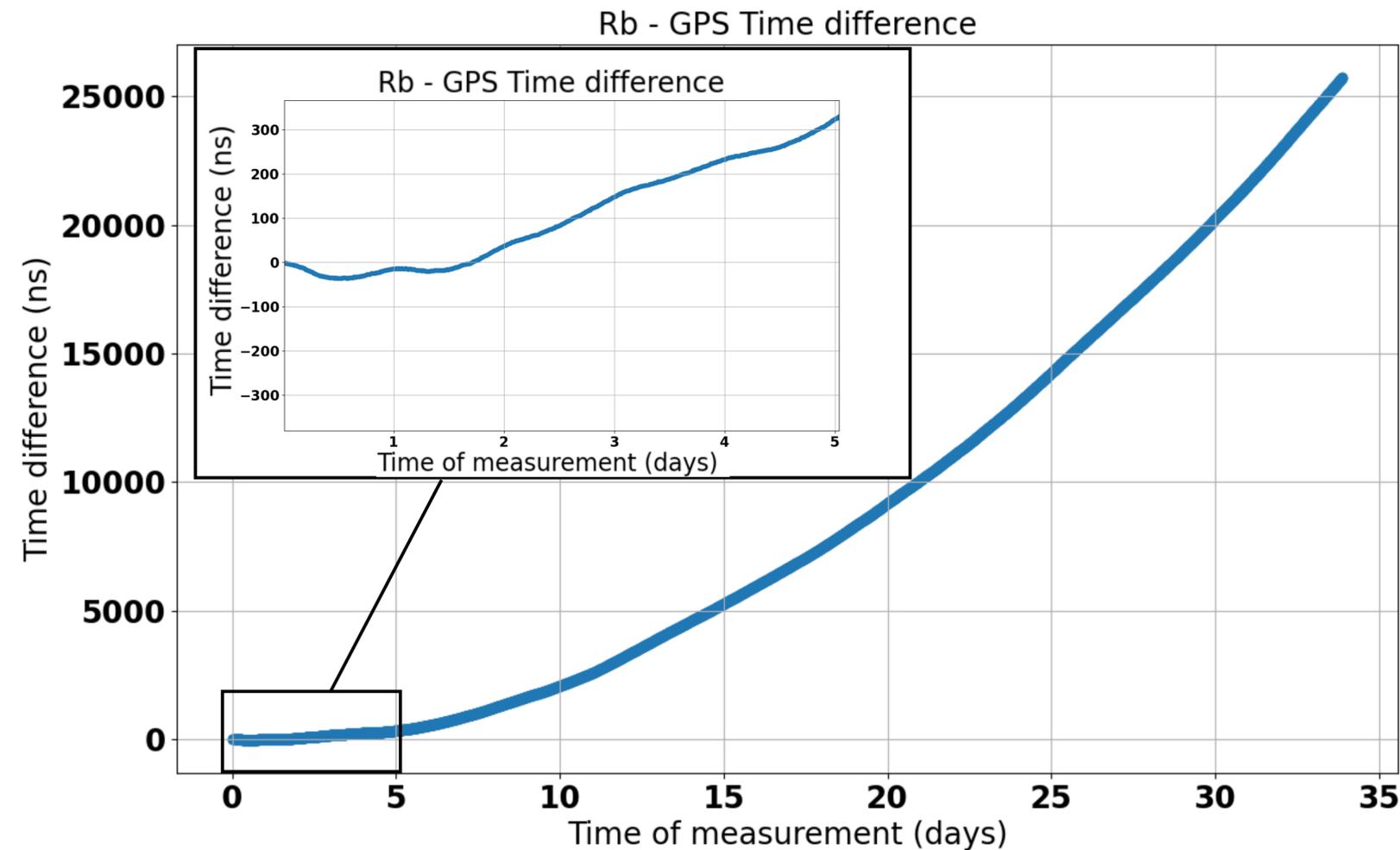
- Rubidium vs GPS: pour extraire la correction
- Rubidium vs UTC(OP): pour vérifier la stabilité du signal rubidium après correction



# Génération du temps dans HK

## Test de la correction pour la synchronisation avec le GPS

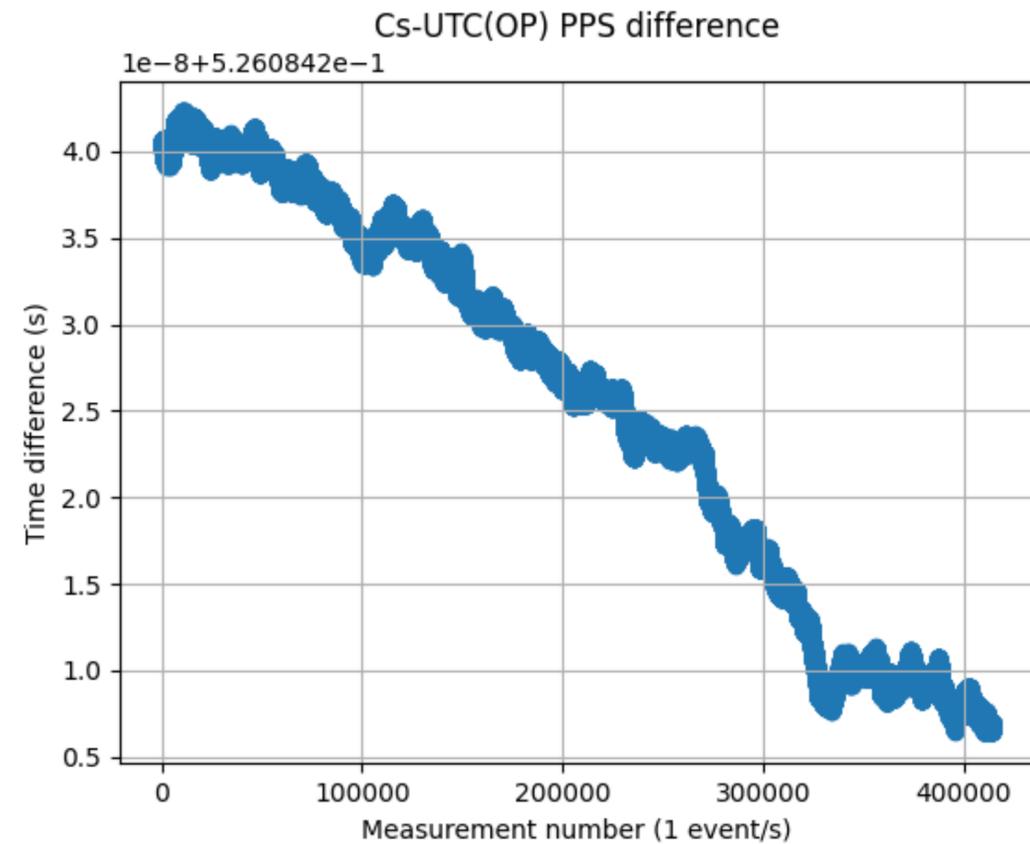
Papier publié dans NIM A (février 2025): on montre une synchronisation à l'UTC de l'ordre de  $\pm 5$  ns!



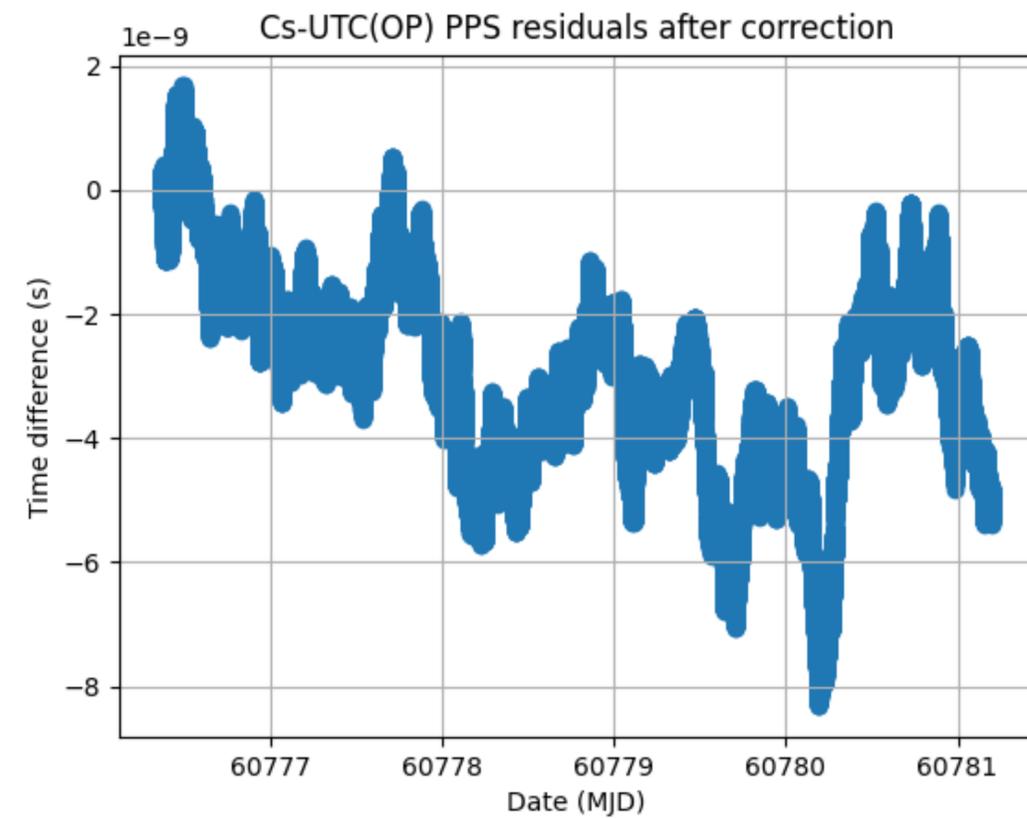
# Génération du temps dans HK

## Implémentation

- Implémentation de la correction en temps réel réalisée et testée en février avec l'horloge Rubidium
- Nouvelle horloge Césium mise en route en mars: bien plus stable que la Rubidium



Not corrected: 35 ns drift in ~5 days



Corrected: residuals =  $(-3.0 \pm 1.7)$  ns

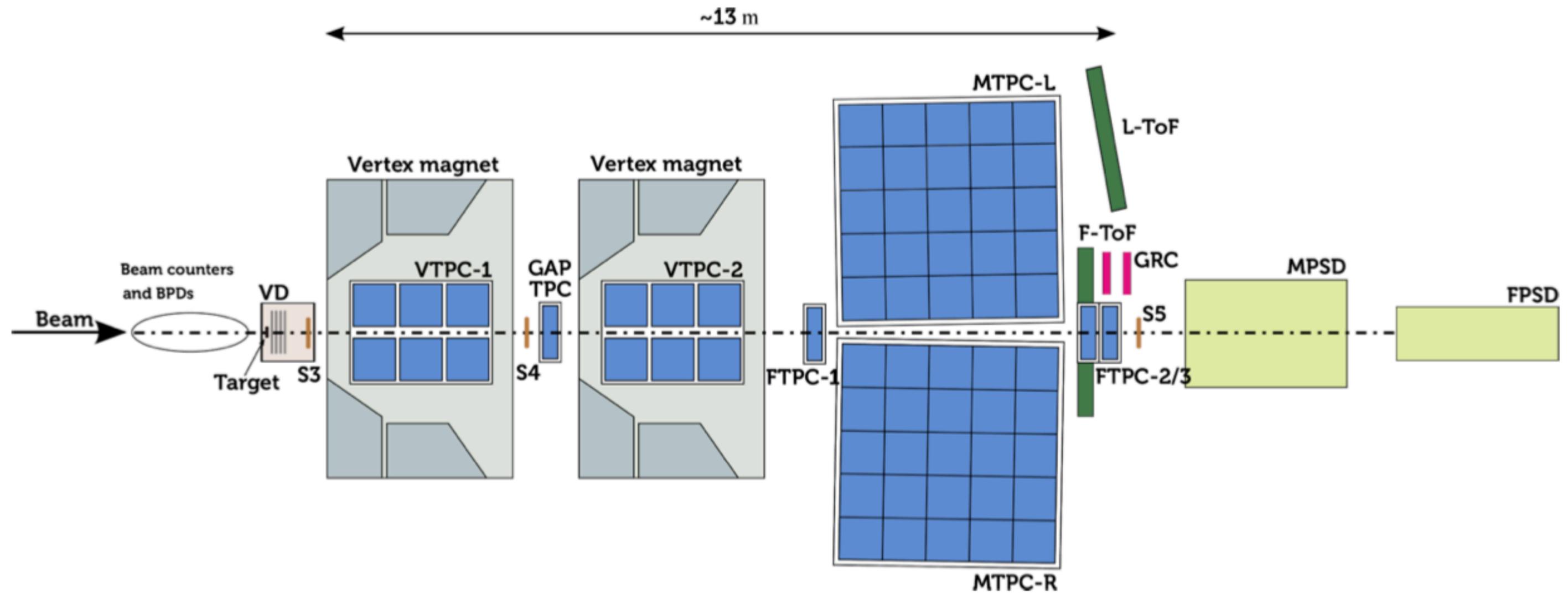
# Calibration et analyse des données NA61/SHINE sur la cible réplique de T2K

# NA61/SHINE

## The detector



Hyper-Kamiokande



# Calibration et analyse

- La calibration a pris du retard à cause de plusieurs problèmes. Cette tâche est maintenant assurée par une autre étudiante
- Je prépare le software pour la reconstruction des données expérimentales et Monte Carlo (encore quelques bugs mais le soft fonctionne)
- But: reconstruire les données non calibrées pour obtenir quelques plots de physiques pour la thèse...

# Présentations et conférences

# Présentations et conférences

Octobre 2022 - Septembre 2024

- Poster at the International Workshop on the Origin of Matter/Antimatter asymmetry: *Towards a better measurement of the CP violation phase with Hyper-Kamiokande*
- Présentations des études de sensibilité pour HK au meeting de l'IRN neutrinos à Nantes (juin 2023)
- Talk at NNN23 , octobre 2023, Procida, Italie (Next Generation Neutrino and Nucleon decay detectors): *Addressing the challenge of neutrino interaction uncertainties in Hyper-Kamiokande*



**Addressing the challenge of neutrino interaction uncertainties in Hyper-Kamiokande**



Claire Dalmazzone, 13th October 2023  
On behalf of Hyper-Kamiokande Collaboration



# Présentations et conférences

Décembre 2023 - Septembre 2025

- Parallel talk au J-PARC Symposium, octobre 2024, Mito, Japan: *Overview of the NA61/SHINE experiment*. Proceedings acceptées par Japan Physics Society.
- Talk au workshop FJPPN (groupe de travail Franco-Japonais en physique des particules), mai 2025, Nantes: présentations du projet NU9 sur T2K/HK et NA61/SHINE
- Parallel talk à EPS, juillet 2025, Marseilles (abstract soumis au nom de la collaboration HK)

# Manuscrit et soutenance

# Manuscrit



- 4 chapitres finalisés: Neutrino physics, The Hyper-Kamiokande experiment, The oscillation analysis
- 3 chapitres presque finis (attente de résultats à venir): Sensitivity results, Time synchronisation, NA61/SHINE
- Premières versions des résumés substantiels (français/anglais), des abstracts (français/anglais) et de la conclusion à faire relire

# Soutenance



- Jury validé par l'ED
- Date sélectionnée: 16 septembre 2025
- Amphi Charpak réservé
- Formulaire ADUM en cours de complétion
- Plan: envoyer une première version du rapport début juin

# Articles publiés

# Articles publiés



Co-auteurice de 2 collaborations

- T2K grâce aux shifts remote de 2023 et shifts sur site en juin 2024 et février 2025, 3 nouveaux articles depuis Mai 2024:
  - <https://arxiv.org/abs/2405.12488>, <https://arxiv.org/abs/2503.06843>, <https://arxiv.org/abs/2503.06849>
- NA61/SHINE grâce à ma contribution sur la calibration et aux shifts (environ 6 jours par an), 2 nouveaux articles depuis Mai 2024:
  - <https://arxiv.org/abs/2410.23098>, <https://arxiv.org/abs/2503.22484>
- Papier écrit au LPNHE: [NIM A, 1705 \(2025\) 170358](#)

# Points de thèse

# Points de thèse

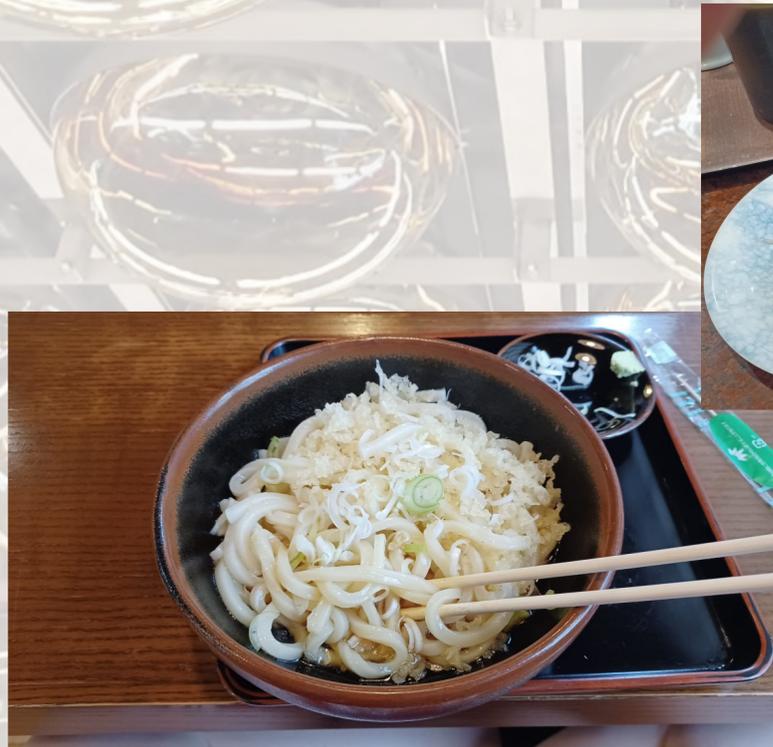
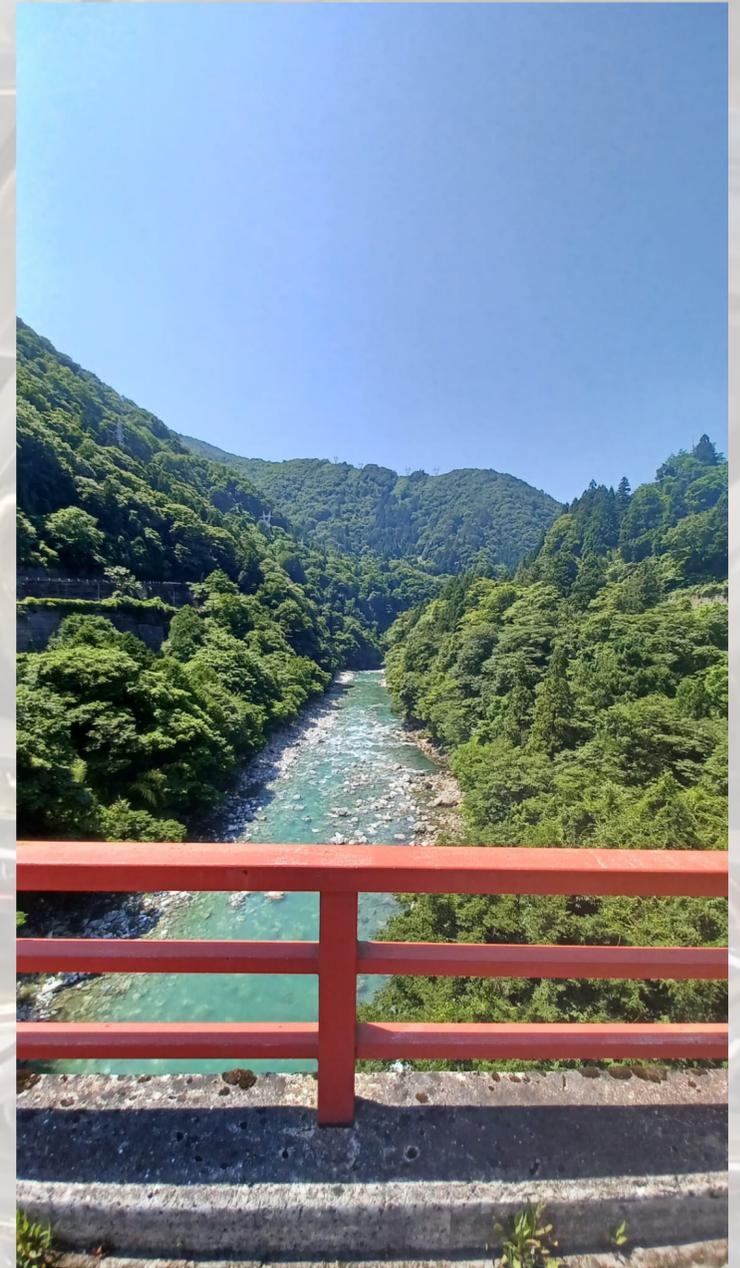
15 points, déjà validé par Irena et Julien:

- Cours intégrité scientifique (10 novembre 2022): 1pt
- 2 ans d'enseignement: 2pts
- Formation à l'enseignement (octobre 2022 + janvier 2023): 2pts
- Applied Data Analytics (novembre 2022) + Advanced Applied Data Analytics (janvier 2024): 5pts
- Elements of Statistics (juin 2023): 4pts
- Cours sur beamer (décembre 2024): 1pt



# Hyper-Kamiokande

# Thank you!

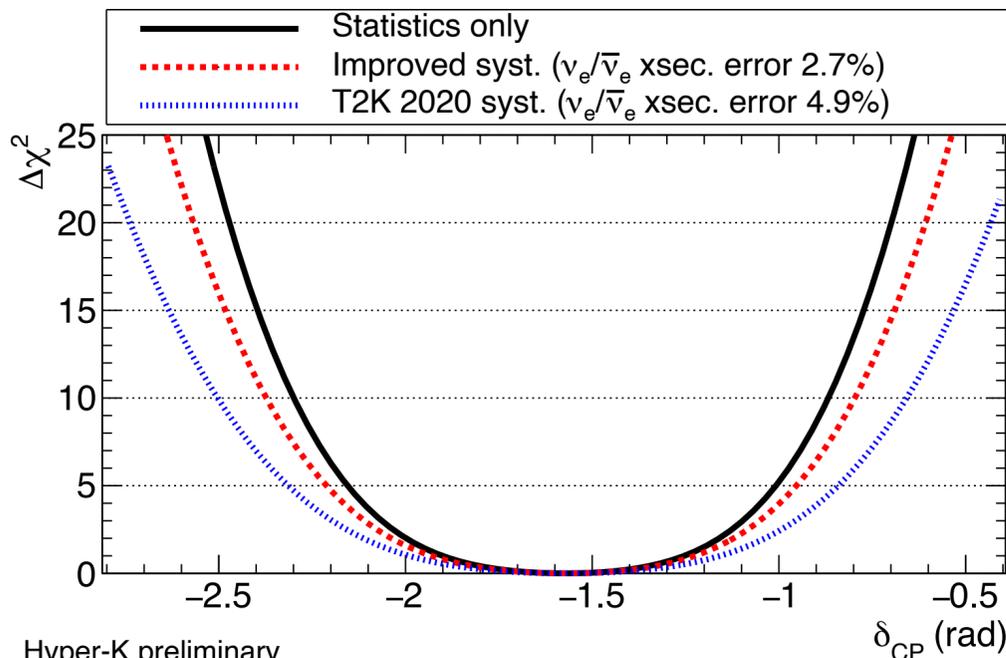


# HK sensitivity studies

## Results

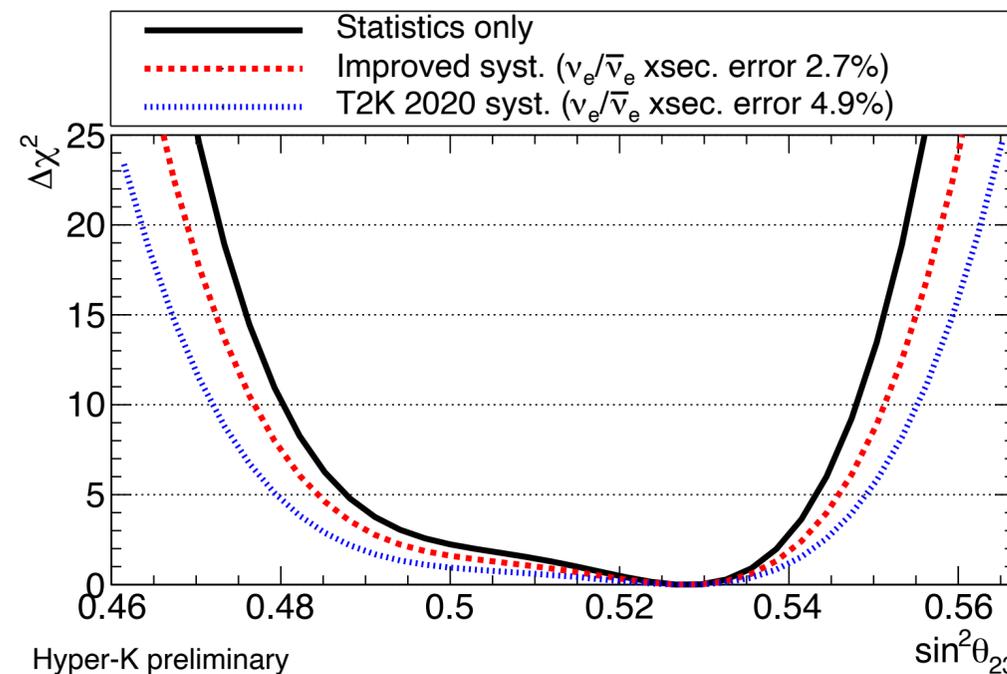


Sensitivity after 10 years of data-taking:  $\Delta\chi^2$  curves



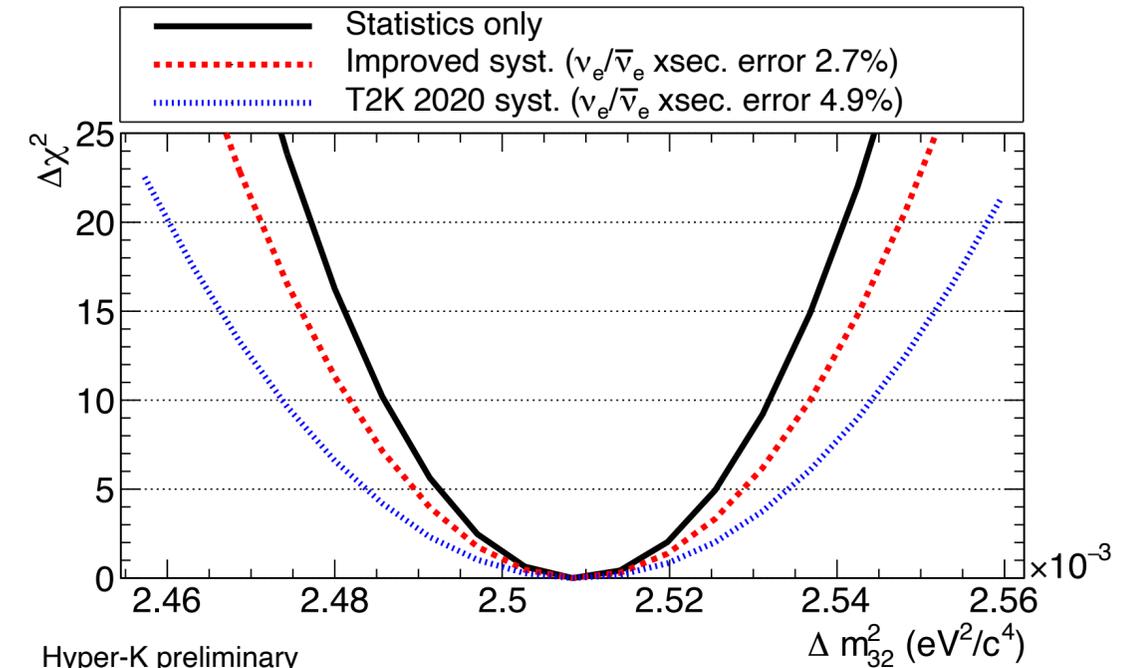
Hyper-K preliminary  
 True normal ordering (known), 10 years ( $2.7 \times 10^{22}$  POT 1:3  $\nu:\bar{\nu}$ )  
 $\sin^2\theta_{13}=0.0218 \pm 0.0007$ ,  $\sin^2\theta_{23}=0.528$ ,  $\Delta m_{32}^2=2.509 \times 10^{-3} \text{ eV}^2/c^4$ ,  $\delta_{CP}=-\pi/2$

$\delta_{CP}$



Hyper-K preliminary  
 True normal ordering (known), 10 years ( $2.7 \times 10^{22}$  POT 1:3  $\nu:\bar{\nu}$ )  
 $\sin^2\theta_{13}=0.0218 \pm 0.0007$ ,  $\sin^2\theta_{23}=0.528$ ,  $\Delta m_{32}^2=2.509 \times 10^{-3} \text{ eV}^2/c^4$ ,  $\delta_{CP}=-1.601$

$\sin^2 \theta_{23}$



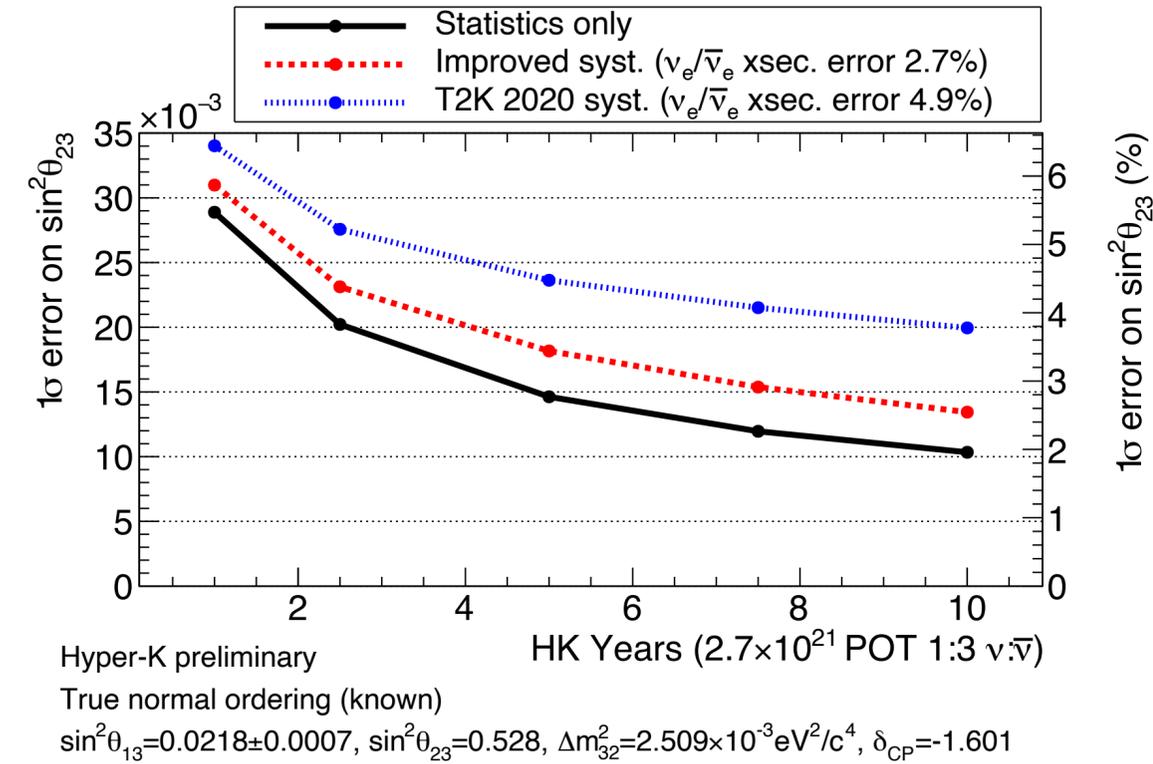
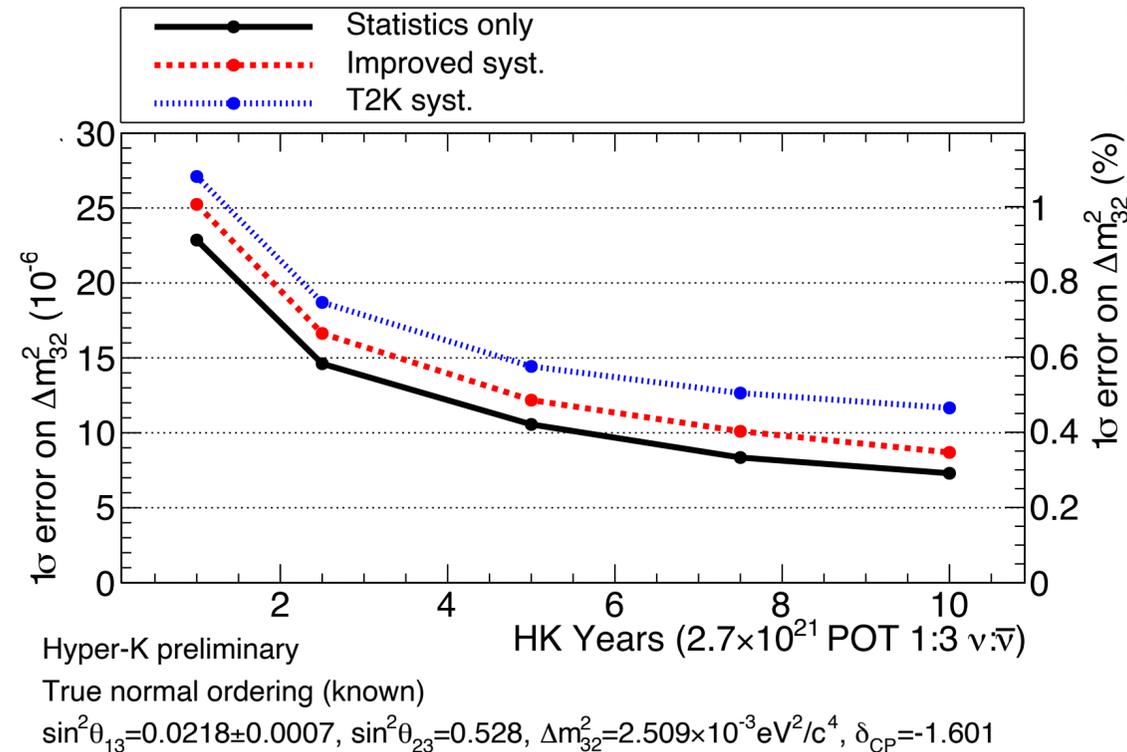
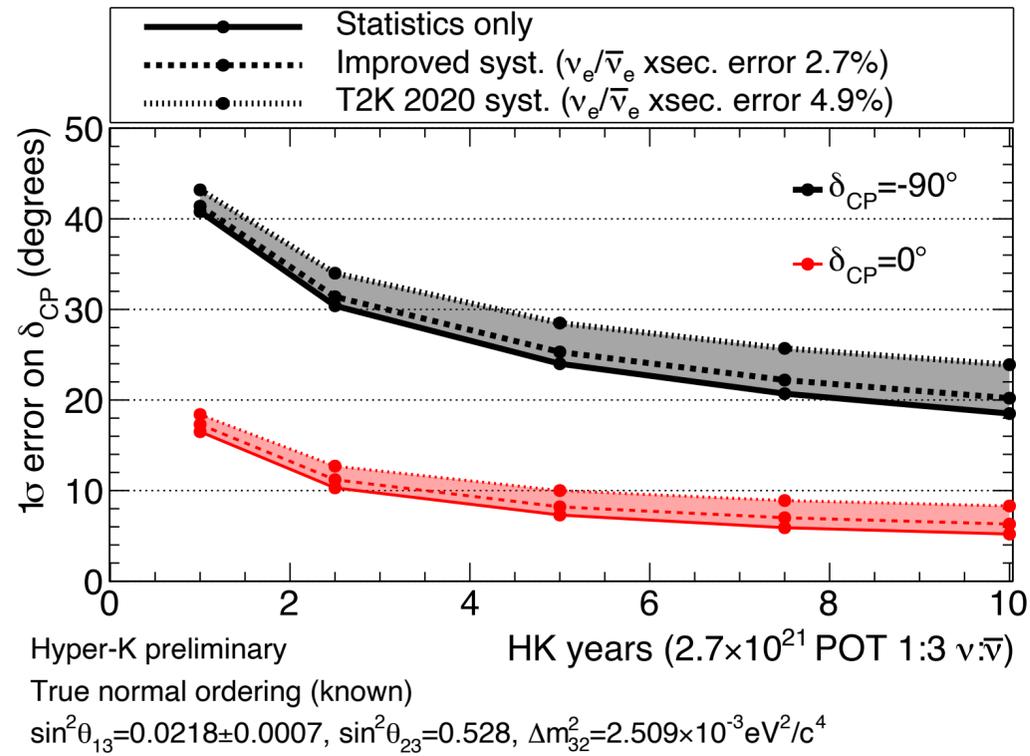
Hyper-K preliminary  
 True normal ordering (known), 10 years ( $2.7 \times 10^{22}$  POT 1:3  $\nu:\bar{\nu}$ )  
 $\sin^2\theta_{13}=0.0218 \pm 0.0007$ ,  $\sin^2\theta_{23}=0.528$ ,  $\Delta m_{32}^2=2.509 \times 10^{-3} \text{ eV}^2/c^4$ ,  $\delta_{CP}=-1.601$

$\Delta m_{32}^2$

We estimate the resolution by taking the width of the curves at  $\Delta\chi^2 = 1$

# HK sensitivity studies

## Results

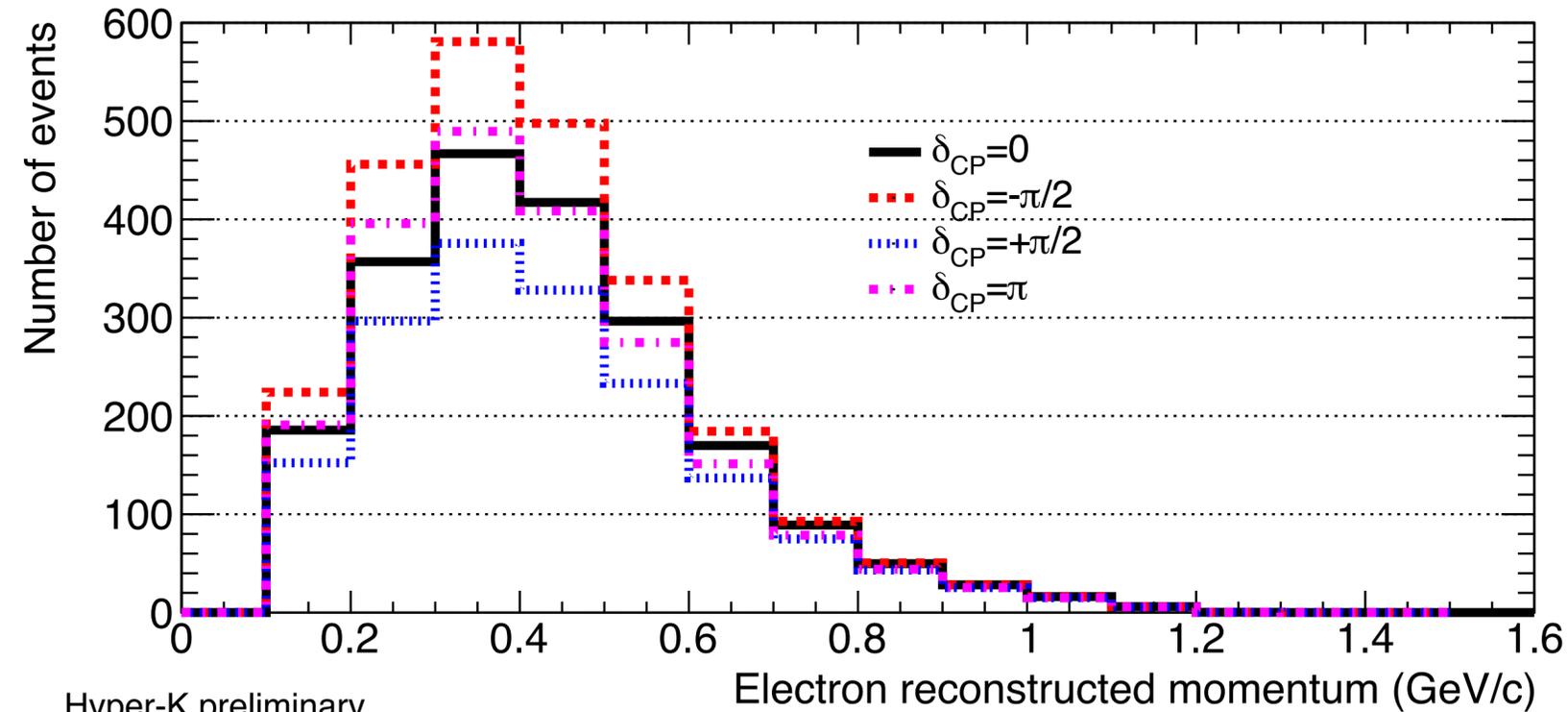




## Plan to reduce systematics

### Example: $\nu_e/\bar{\nu}_e$ cross-section ratio uncertainty

Far Detector,  $\nu$  mode, 1-ring e-like + 0 decay e

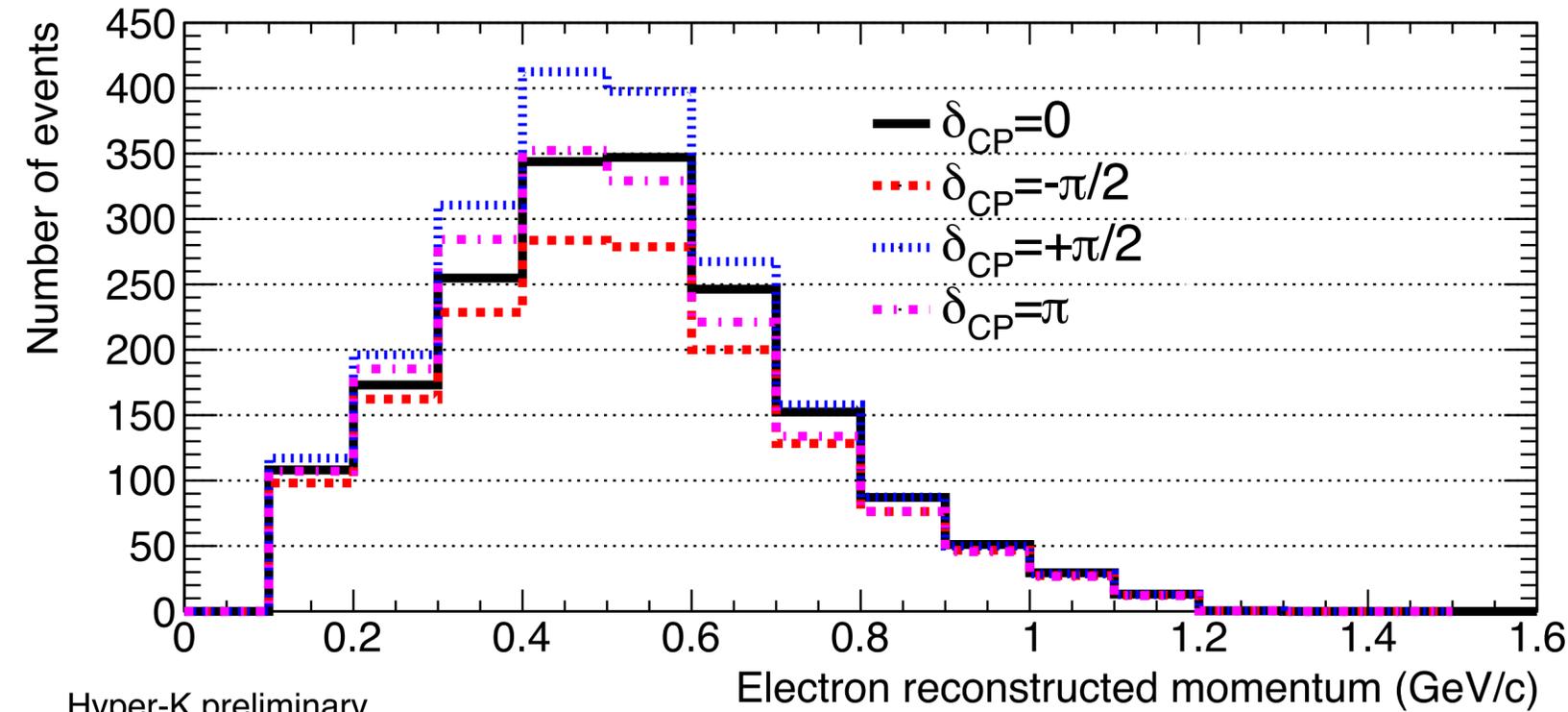


Hyper-K preliminary

10 years ( $2.7 \times 10^{22}$  POT 1:3  $\nu:\bar{\nu}$ )

True Normal Ordering,  $\sin^2\theta_{13}=0.0218$ ,  $\sin^2\theta_{23}=0.528$ ,  $\Delta m_{32}^2=2.509 \times 10^{-3} \text{eV}^2/c^4$

Far Detector,  $\bar{\nu}$  mode, 1-ring e-like + 0 decay e



Hyper-K preliminary

10 years ( $2.7 \times 10^{22}$  POT 1:3  $\nu:\bar{\nu}$ )

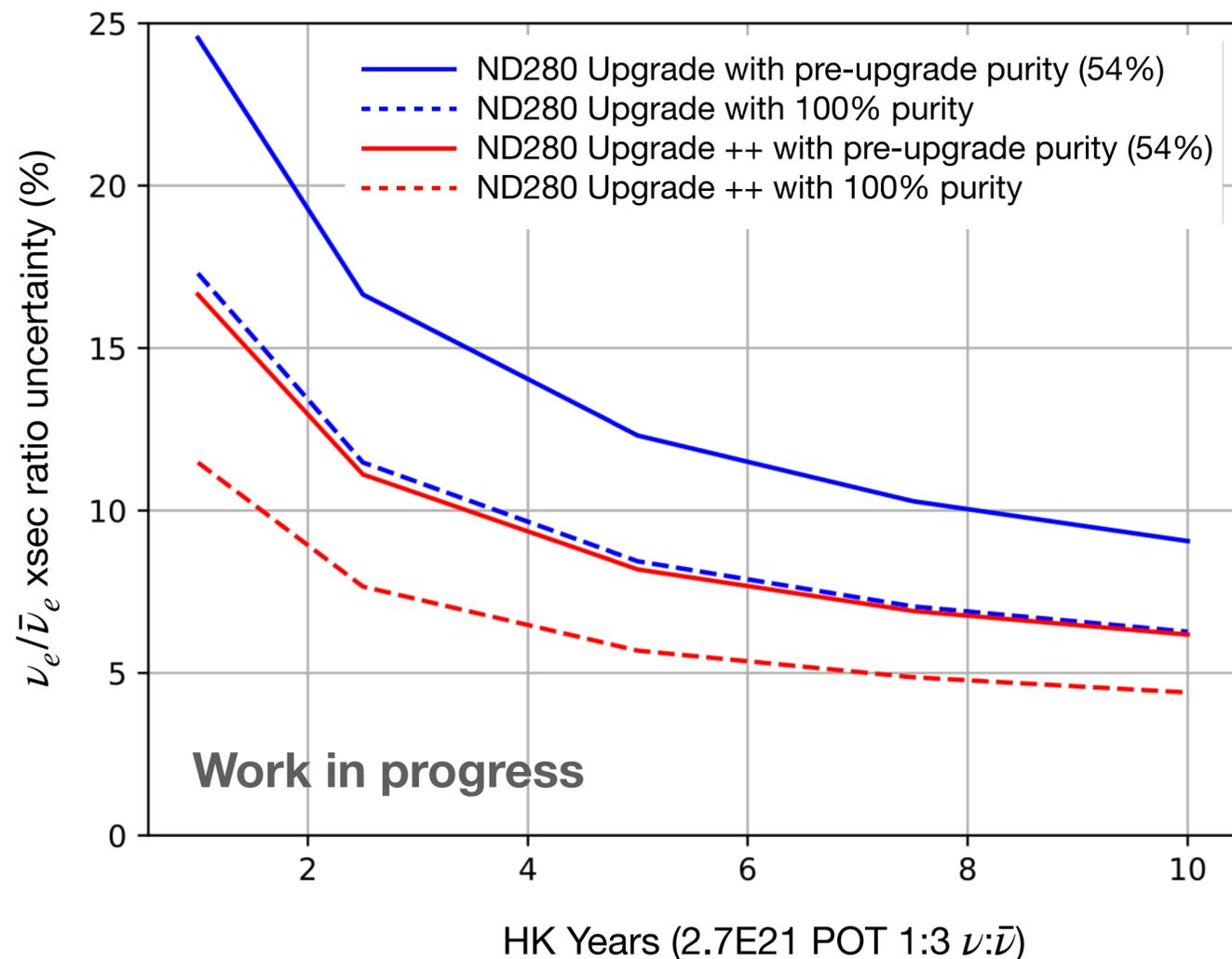
True Normal Ordering,  $\sin^2\theta_{13}=0.0218$ ,  $\sin^2\theta_{23}=0.528$ ,  $\Delta m_{32}^2=2.509 \times 10^{-3} \text{eV}^2/c^4$



# Plan to reduce systematics

## Example: $\nu_e/\bar{\nu}_e$ cross-section ratio uncertainty

This measurement is challenging as the  $\nu_e/\bar{\nu}_e$  contamination of the beam is very low (few percents)



With **only ND280 upgrade**, could reach a **~7.5%** uncertainty or below with the upgrade ++

**Estimation of ND280 constraint on  $\sigma(\nu_e)/\sigma(\bar{\nu}_e)$  with upgrade or upgrade ++ mass, pre-upgrade efficiency and pre-upgrade or 100% purity.**

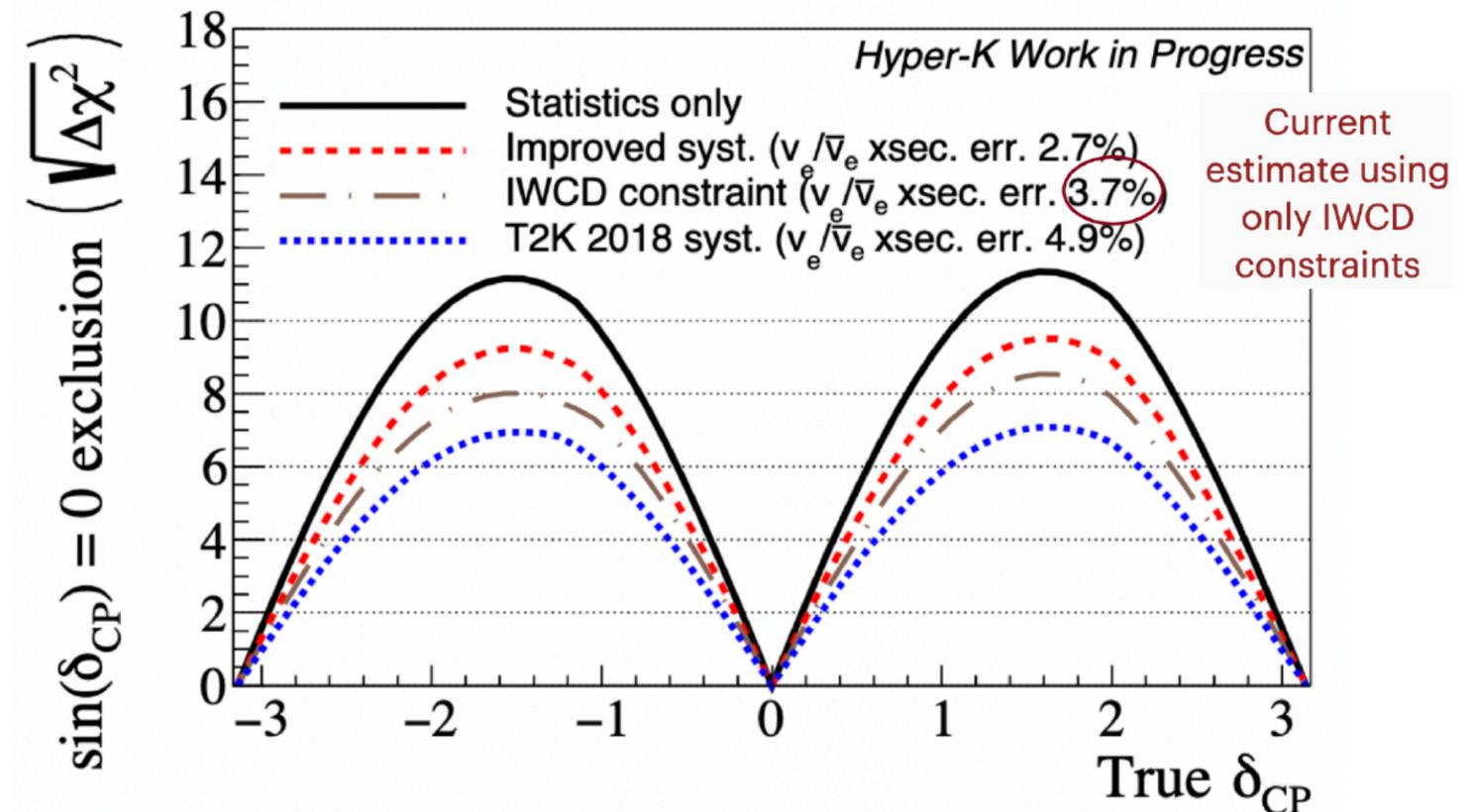


## Plan to reduce systematics

### Example: $\nu_e/\bar{\nu}_e$ cross-section ratio uncertainty

With **only IWCD**, could reach a  **$\sim 3.7\%$**  uncertainty

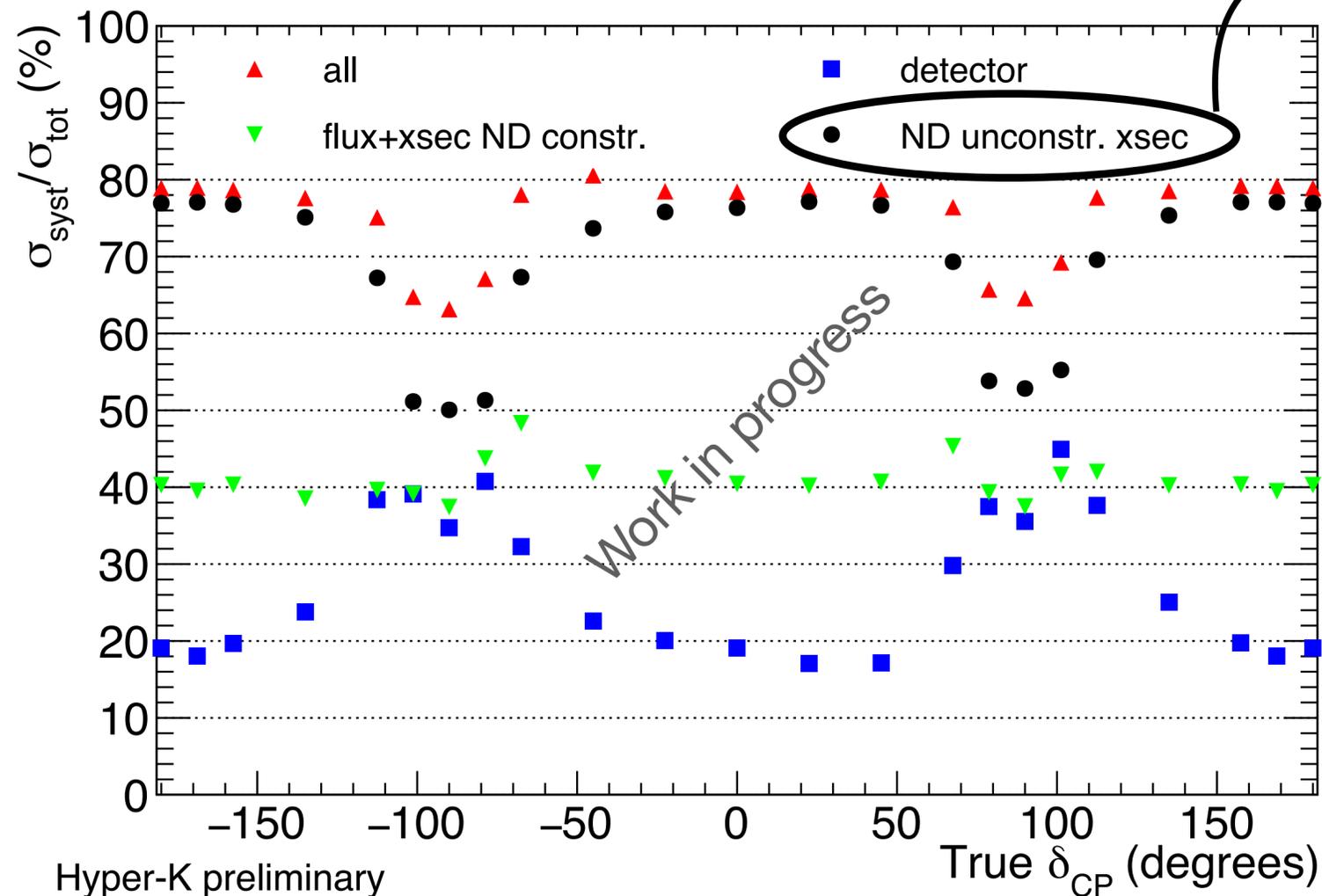
With **ND280 upgrade (++) and IWCD**, the goal is to go **below 3%** uncertainty after 10 years of HK-LBL



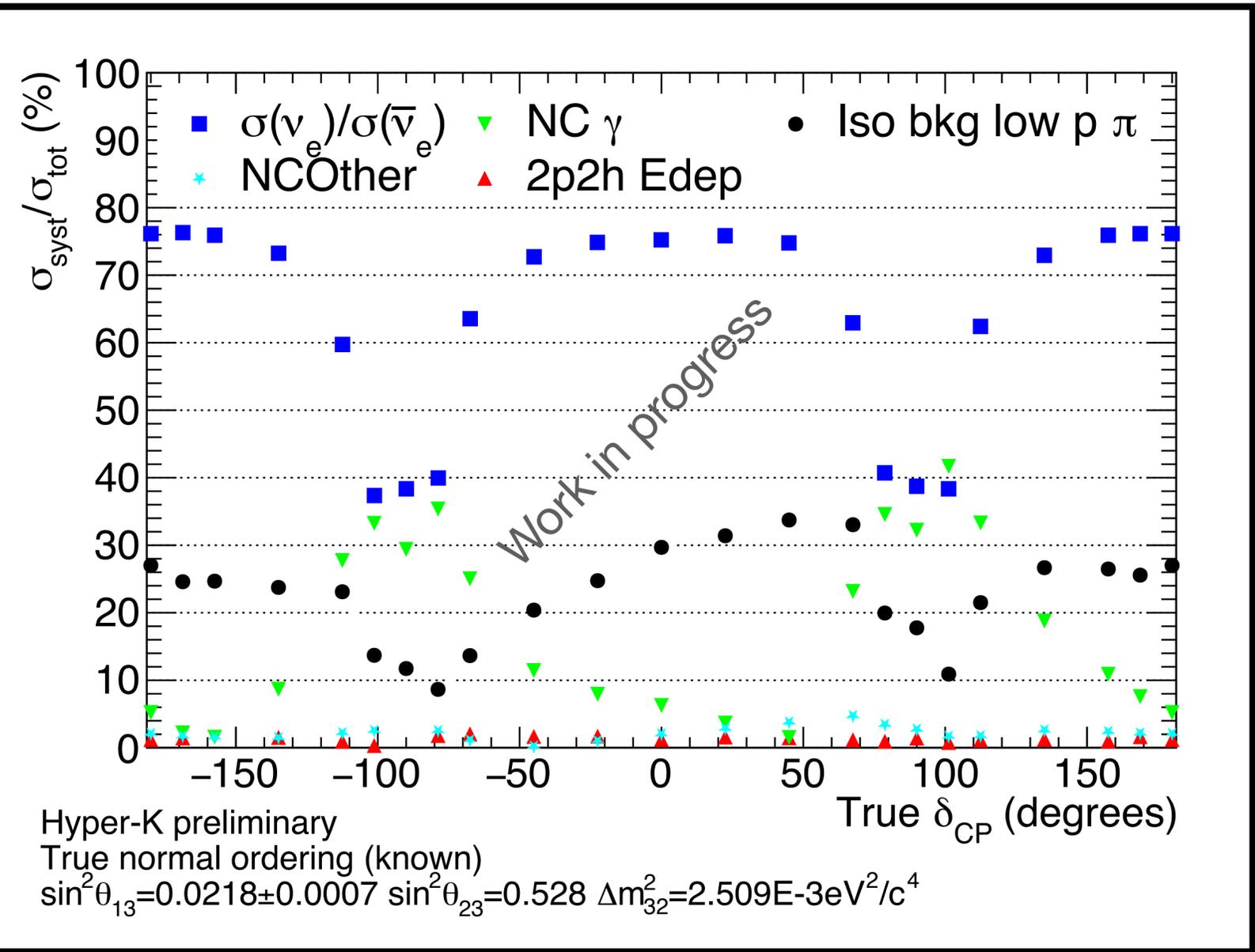
Significance level to exclude the CP-conserving values (0 and  $\pm\pi$ ) of  $\delta_{CP}$  after 10 years with HK.

# Plan to reduce systematics

Systematics not currently measured by ND280



Hyper-K preliminary  
 True normal ordering (known)  
 $\sin^2\theta_{13}=0.0218\pm 0.0007$   $\sin^2\theta_{23}=0.528$   $\Delta m_{32}^2=2.509E-3eV^2/c^4$

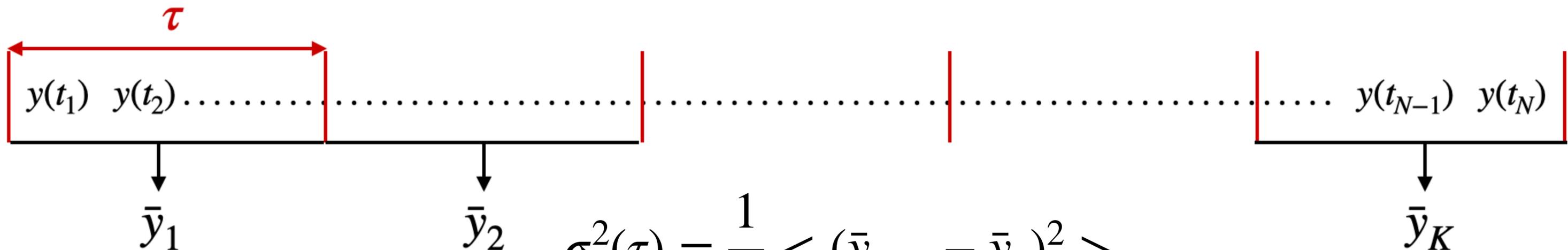


Hyper-K preliminary  
 True normal ordering (known)  
 $\sin^2\theta_{13}=0.0218\pm 0.0007$   $\sin^2\theta_{23}=0.528$   $\Delta m_{32}^2=2.509E-3eV^2/c^4$

# Timing distribution

## Equipment characterisation

The Allan Standard Deviation is used to characterise the stability of a signal compared to another using **frequency ratio**  $y$ . For  $N$  measurements, we split the measurement time into  $K$  time intervals of a given length  $\tau$ .



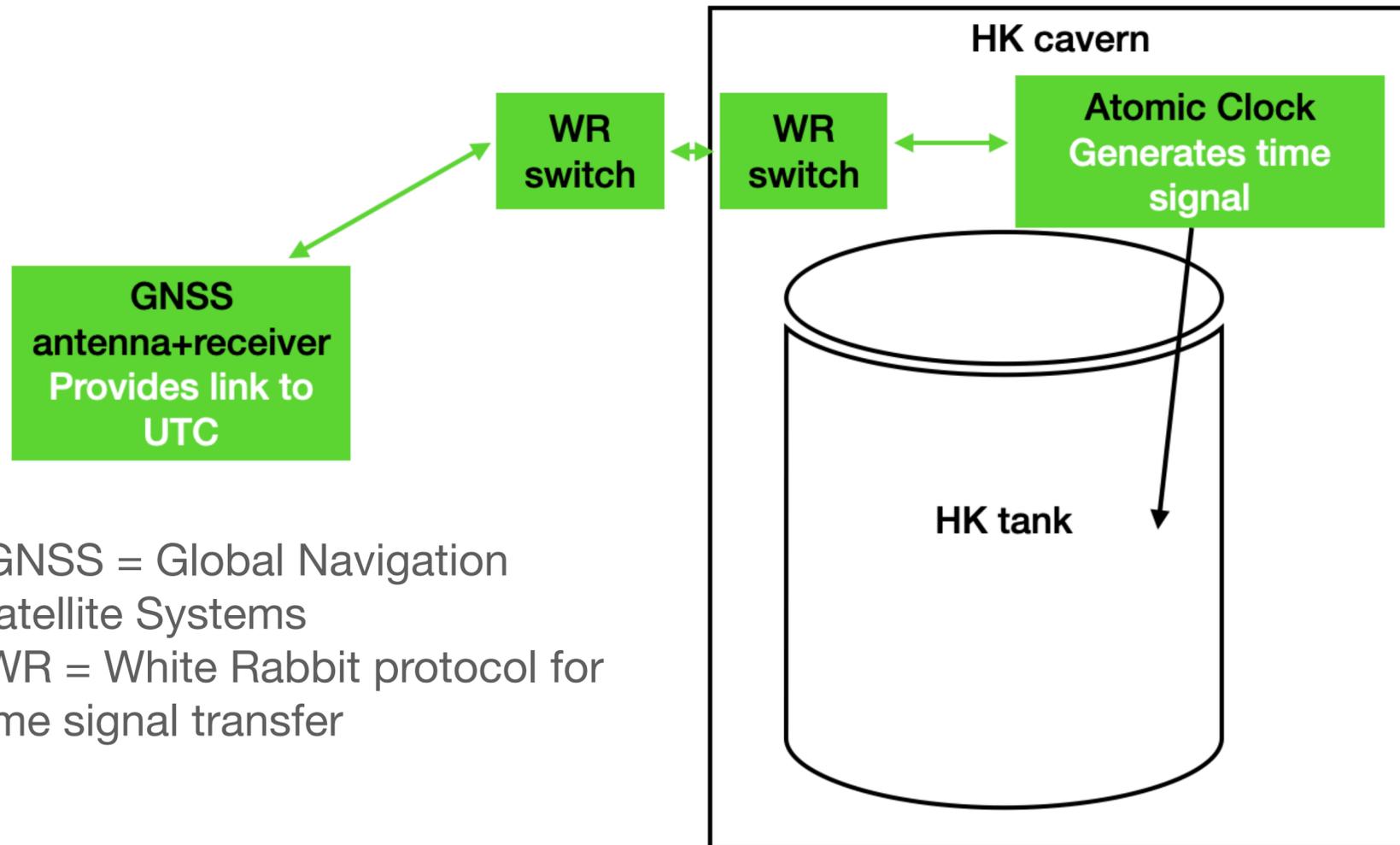
$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_{n+1} - \bar{y}_n)^2 \rangle$$

Difference of the mean of  $y$  for two consecutive intervals of length  $\tau$

A similar formula can be derived for overlapping intervals and for time differences instead of frequency ratios



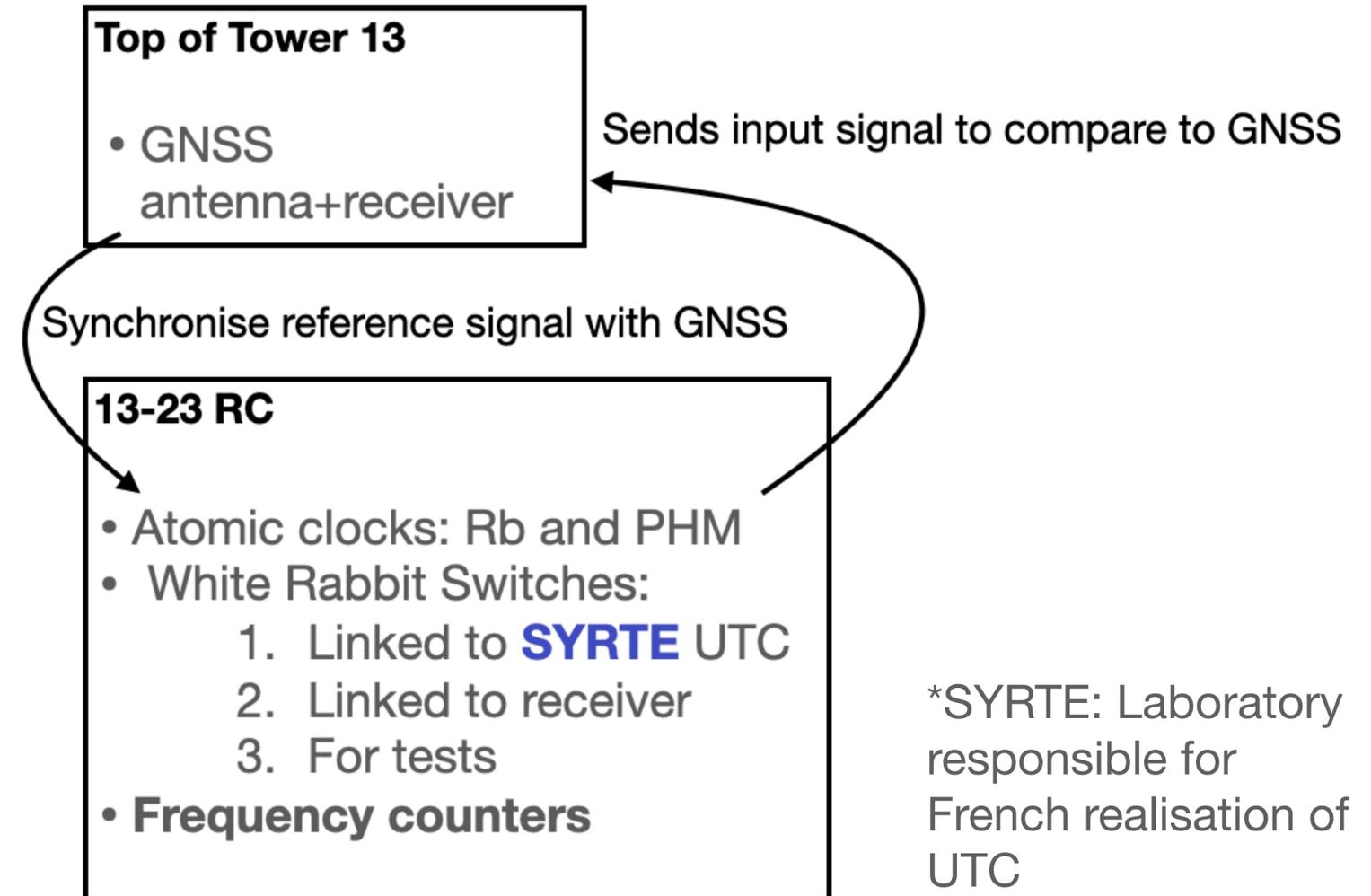
# Timing distribution Setups for the time generation



Foreseen setup for HK

\*GNSS = Global Navigation Satellite Systems

\*WR = White Rabbit protocol for time signal transfer



Setup at LPNHE

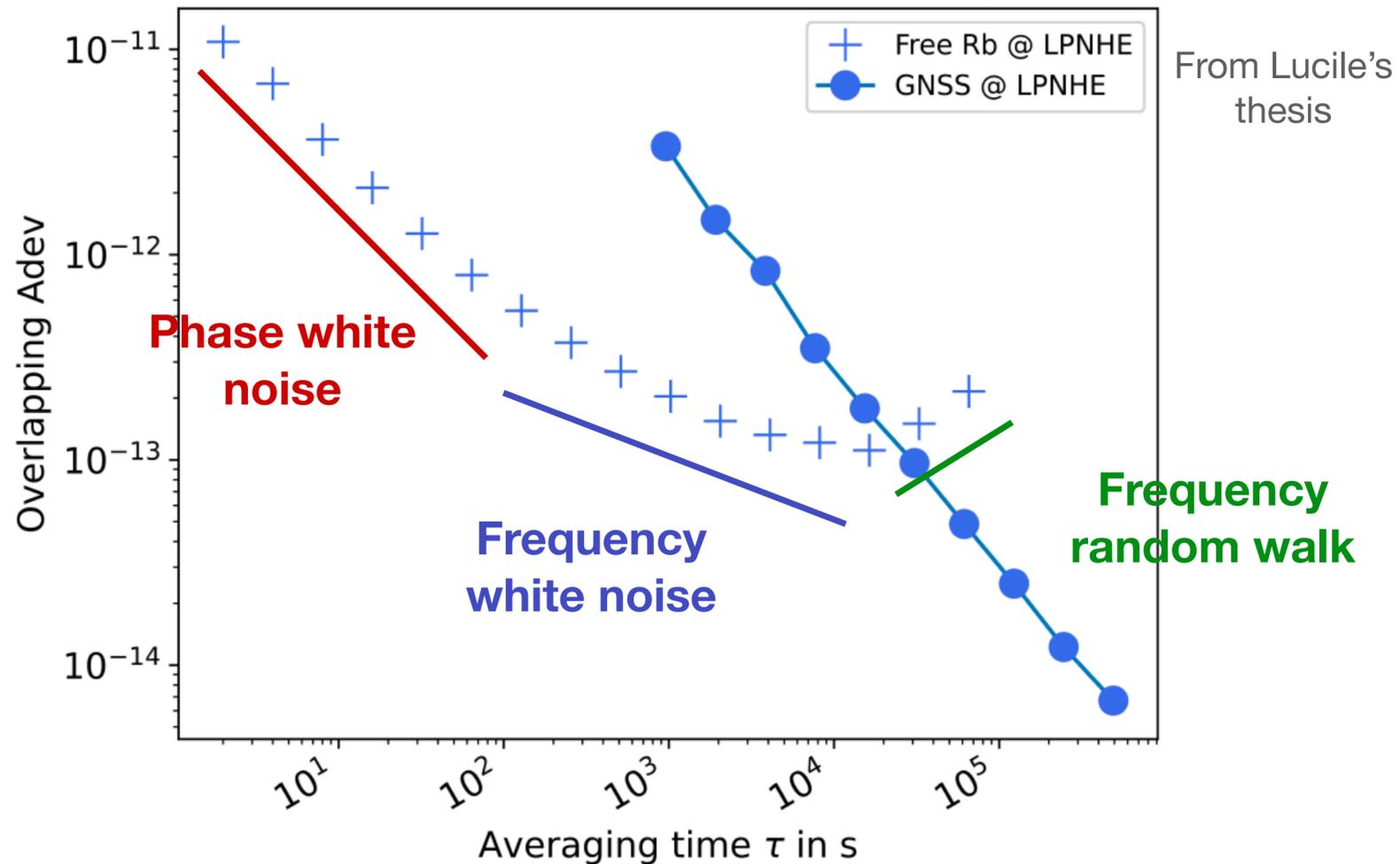
\*SYRTE: Laboratory responsible for French realisation of UTC

# Timing distribution

## Equipment characterisation

The ASD  $\sigma(\tau)$  can then be plotted as function of  $\tau$ . The dependency in  $\tau$  depends on the type of noise in the signal.

Allan standard deviations of free Rb clock and GPS signals @ LPNHE



The Rubidium signal is more stable than the GNSS at short term but gets worse at long term because of the frequency random walk.

Need to correct the long term instability due to the frequency random walk

From Lucile's thesis

# Timing distribution

## Rubidium clock signal correction

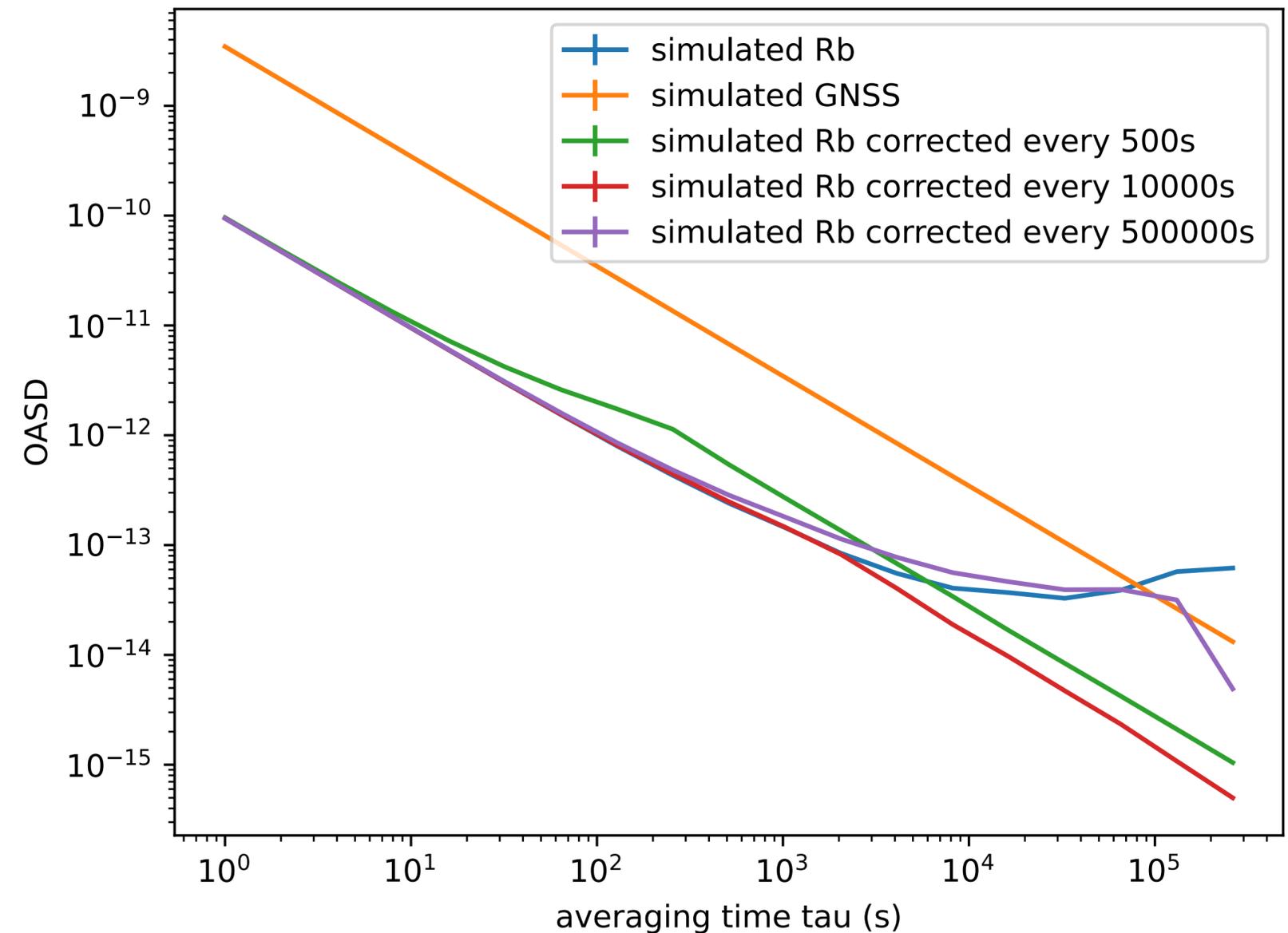
The frequency random walk leads to a polynomial time dependency of the time differences between the Rb and the GNSS PPS:

$$t_{Rb}^i - t_{GNSS}^i = a \times t_i^2 + b \times t_i + c \text{ for } i^{th} \text{ measurement}$$

So one can **regularly** fit  $\Delta t_{Rb,GNSS}(t)$  and correct:

$$t_{Rb,corr}^i = t_{Rb}^i - (a \times t_i^2 + b \times t_i + c)$$

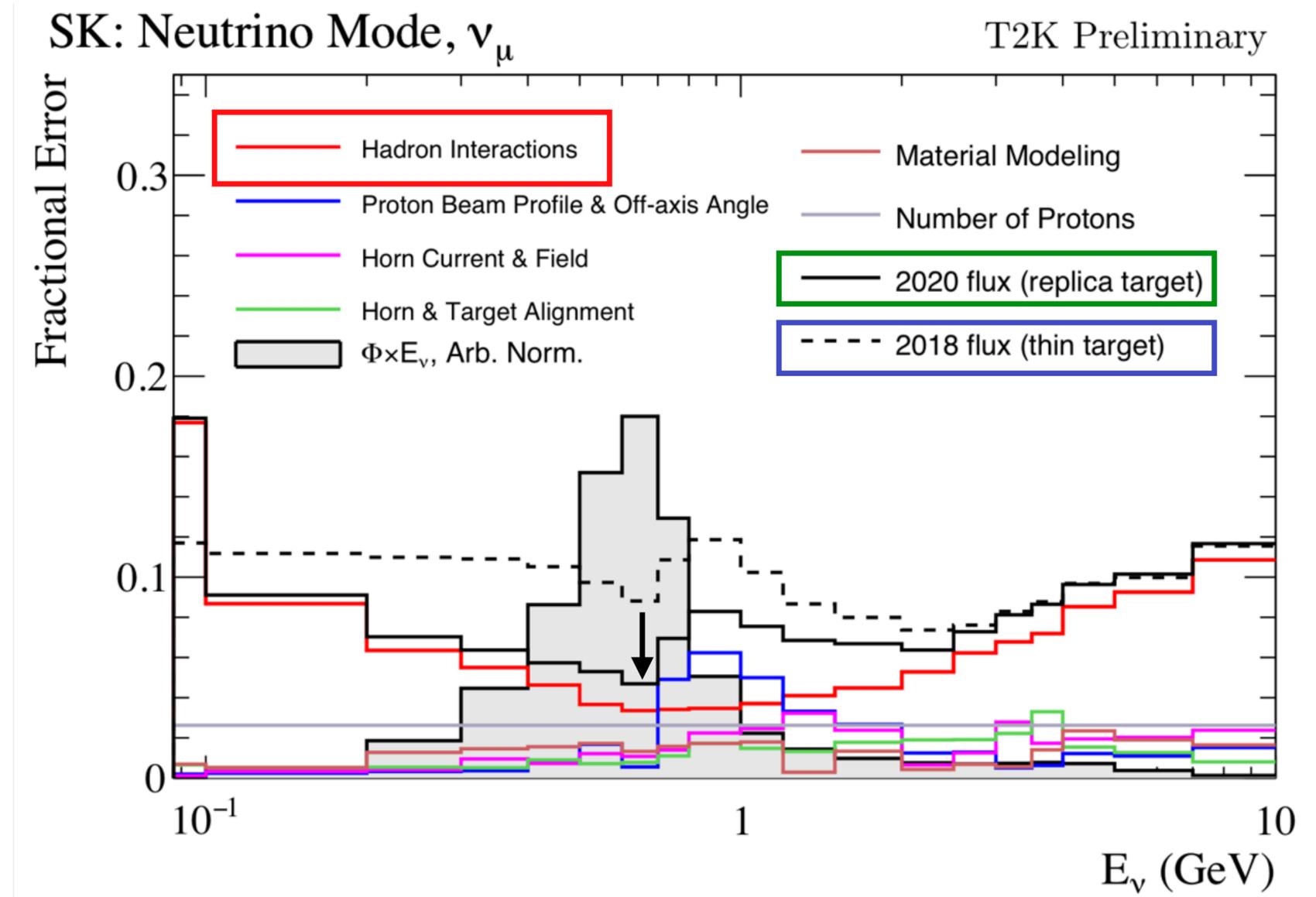
**Measurement in progress to try the correction with experimental data.**



# NA61/SHINE

## Reducing the flux uncertainties

- Main uncertainty on flux: **hadron interaction uncertainties**.
- The last **replica target** measurements allowed to reduce the uncertainty to **5% at the flux peak!**
- **New NA61/SHINE data with replica target in 2022:** measure charged hadron +  $K_S^0$  production in T2K target
- **My task:** calibration (in progress) and analysis of the new dataset

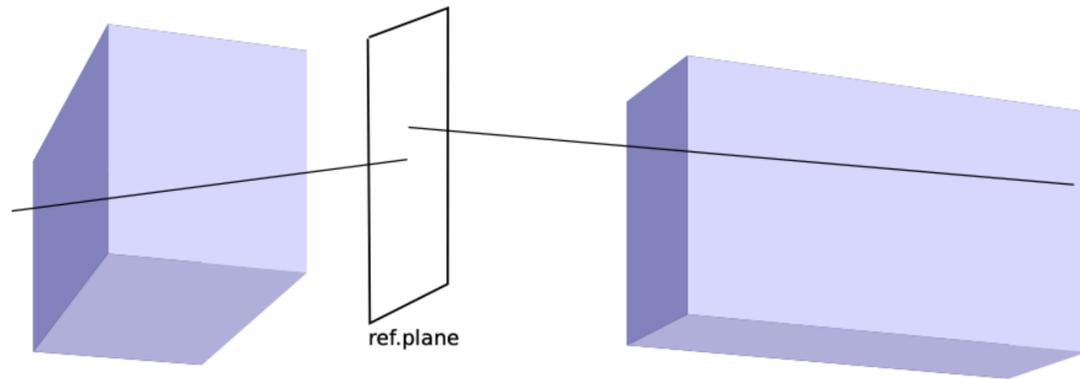


# Field off alignment procedure

## Description



Take main-vertex tracks, dissect to local tracks, refit them locally, check mismatch.



Local tracks parametrisation

$$x = M_x + (z - z_{ref}) \cdot N_x$$

$$y = M_y + (z - z_{ref}) \cdot N_y$$

Each chamber has 8 unknowns:  $\theta_x, \theta_y, \theta_z, x_0, z_0, v_{drift}, t_0, y_0$ .

Assume that e.g. downstream chamber is calibrated (except for  $t_0, y_0$ ): our reference.

# Field off alignment procedure

## Description

For field off data and approximately horizontal tracks ( $N_y \approx 0$ ):

$$\Delta N_x = (N_x^2 + 1) \cdot \theta_y$$

$$\Delta N_y = -N_x \cdot \theta_z + \theta_x$$

$$\Delta M_x = (\theta_x \cdot M_y + \theta_y \cdot M_x + z_0) \cdot N_x + \theta_y \cdot z + \theta_x \cdot M_y - x_0$$

First calibrate rotations using  $\Delta N_x$  vs  $N_x$  and  $\Delta N_y$  vs  $N_y$ . Then correct and calibrate  $x_0$  and  $z_0$  using  $\Delta M_x$  vs  $N_x$ .



# Field off alignment procedure

## Workflow

- A working example with documentation of the chain is at [Shine/Applications/Examples2022Plus/Calibration/AlignmentFieldOff](#)
- Calibration done in three steps:
  1. MTPCL vs GRC
  2. VTPC2, FTPC1, FTPC2 vs MTPCL
  3. FTPC3 vs FTPC2 and others vs VTPC2



# Field off alignment procedure

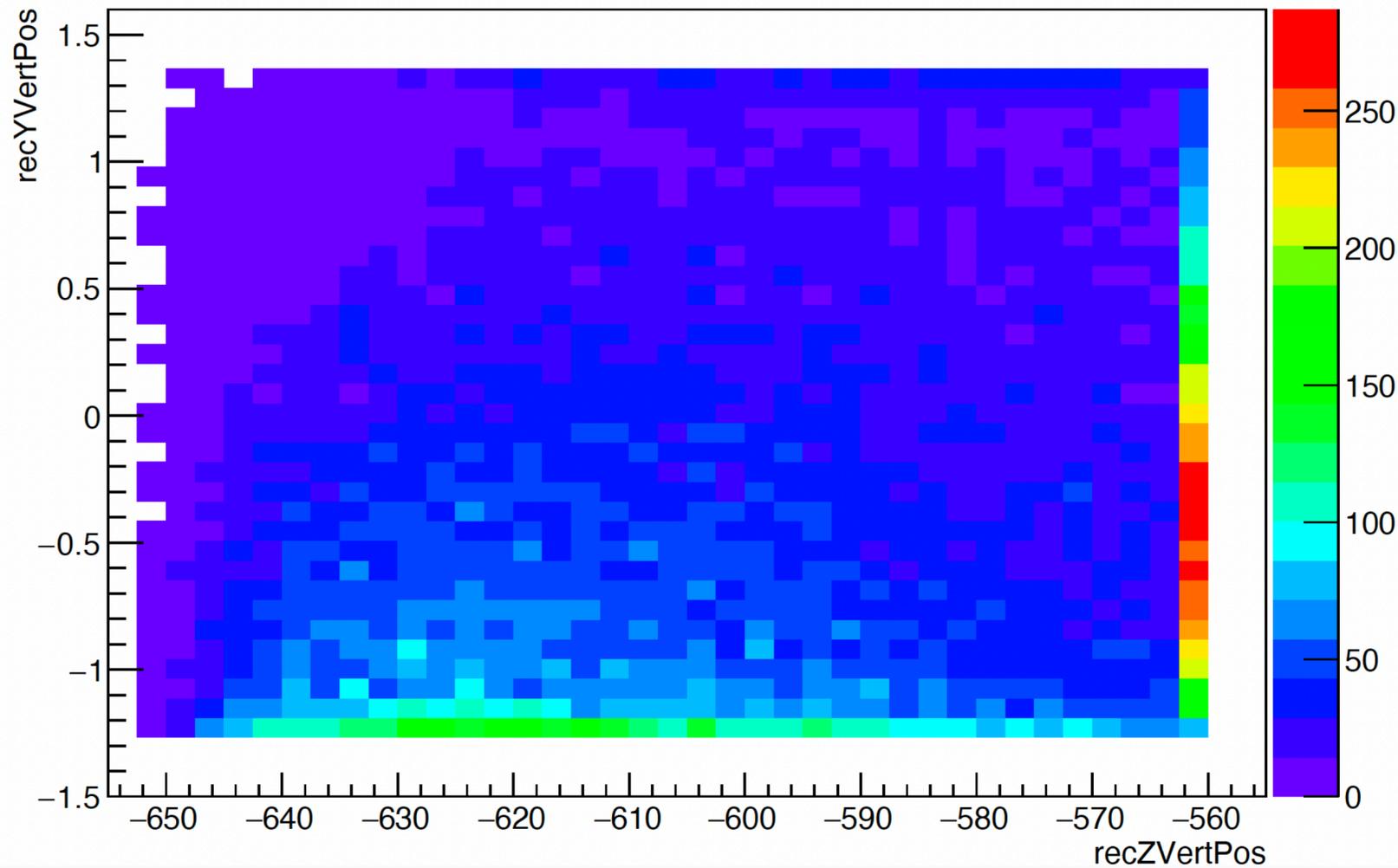
## Workflow

- A working example with documentation of the chain is at [Shine/Applications/Examples2022Plus/Calibration/AlignmentFieldOff](#)
- Calibration done in three steps
- At each step, iterate the mismatch analysis to calibrate:
  - A. Rotation angles (field off data only, not necessary for MTPCL)
  - B.  $x_0$  and  $z_0$  (field off data only, not necessary for MTPCL)
  - C. Drift velocity
  - D.  $t_0$
  - E.  $y_0$

# Calibration et analyse

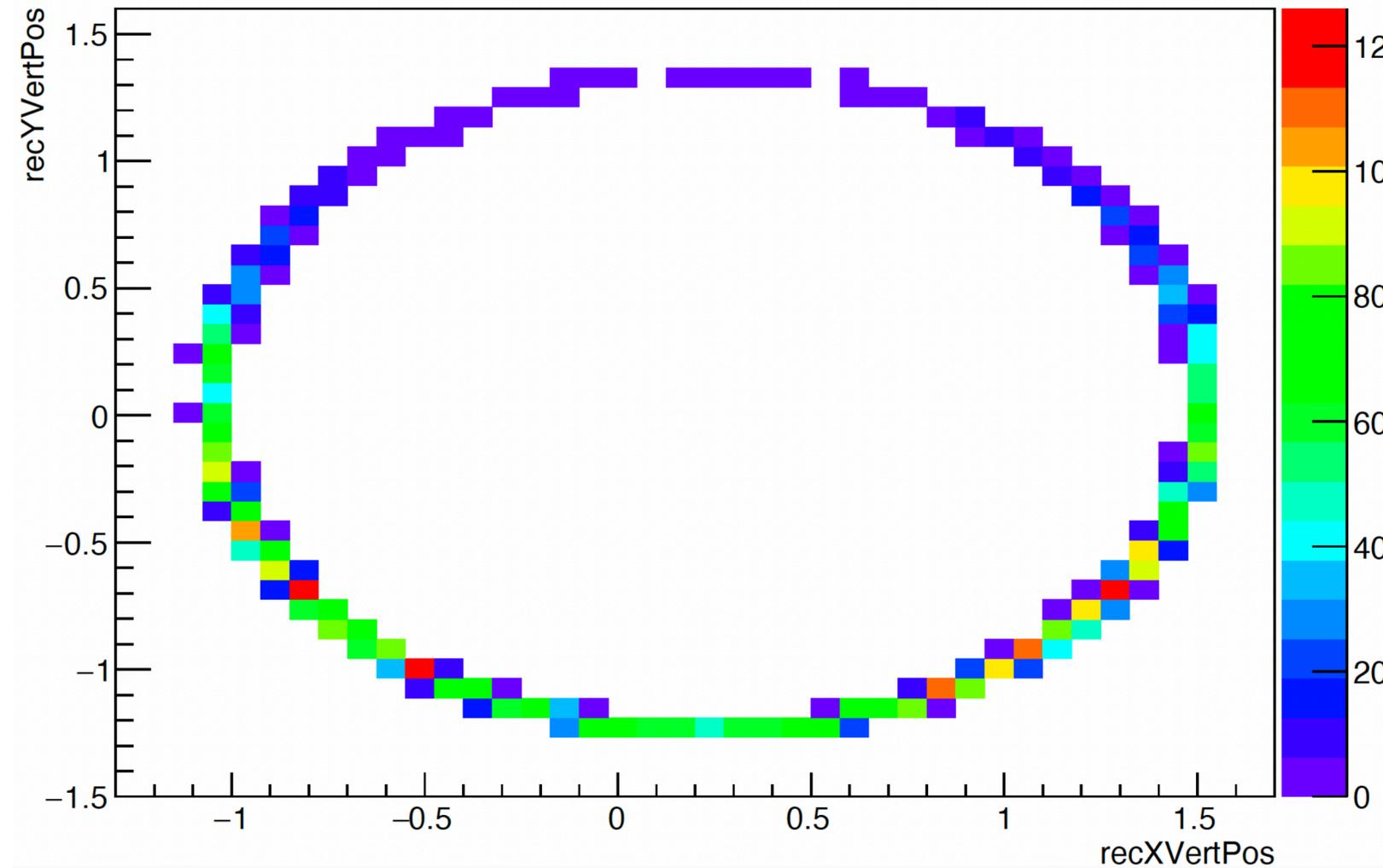
Extrapolation des traces des TPCs sur la surface de la cible, simulation Monte Carlo

recYVertPos:recZVertPos {recP<=31}



Plan parallèle au faisceau

recYVertPos:recXVertPos {recZVertPos>=-650.65&&recZVertPos<-632.65&&recP<=31}



Plan perpendiculaire au faisceau, première portion de la cible

# Calibration et analyse

Simulation Monte Carlo:  
Distribution des particules chargées dans le  
plan (dE/dx, log(p)).

Le PID se fait en ajustant les formules de Bethe  
et Bloch sur cette distribution.

