

ハイパーカミオカンデ前置検出器でのニュートリノCP破れ に関連する断面積比測定精度の予想

安土勇輝、市川温子、Lukas Berns、他 Hyper Kamiokande Collaboration
東北大理

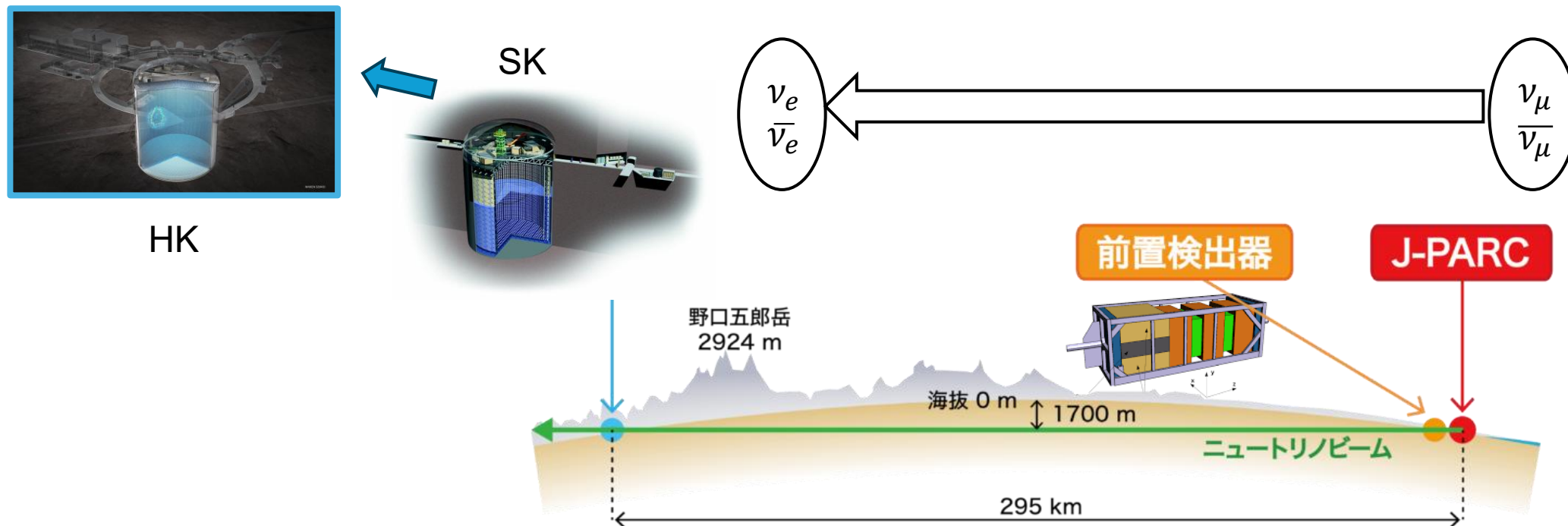
2026/3/24 日本物理学会春季大会 24pT1-3

T2K実験とハイパーカミオカンデを使ったニュートリノ振動実験

T2K実験

- 長基線ニュートリノ振動実験
- J-PARCで、陽子を炭素標的に当ててニュートリノビームを作り、前置検出器と後置検出器であるスーパーカミオカンデ(SK)で観測
- J-PARCでは ν 親粒子を磁場で集束させることで ν or $\bar{\nu}$ を選べる
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の振動確率の違いを調べることでCP対称性の破れの発見を目指す

2028年に後置検出器をハイパーカミオカンデ(HK)としたニュートリノ振動実験が開始



ニュートリノ反応断面積二重比

前置検出器で振動前の ν_μ を測定
 そのうちどの程度 ν_e に振動するかをHKで測る

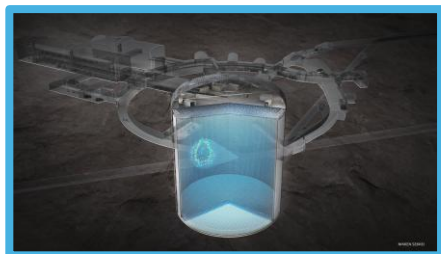


振動確率

これを反ニュートリノでも行い、その振動確率の違いを見る

しかし、観測されるイベント数はフレーバーの違い、 ν か $\bar{\nu}$ かで異なる反応断面積に依存

これら断面積の違いを補正し、振動確率の違いを抜き出したい



ν_e
 $\bar{\nu}_e$

ν_μ
 $\bar{\nu}_mu$

前置検出器で、 $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ の断面積に加えて、以下の断面積比 W を測定することで、CP測定における補正ができる

HK

野口五郎岳
2924 m

海拔 0 m
↑ 1700 m

前置検出器

J-PARC

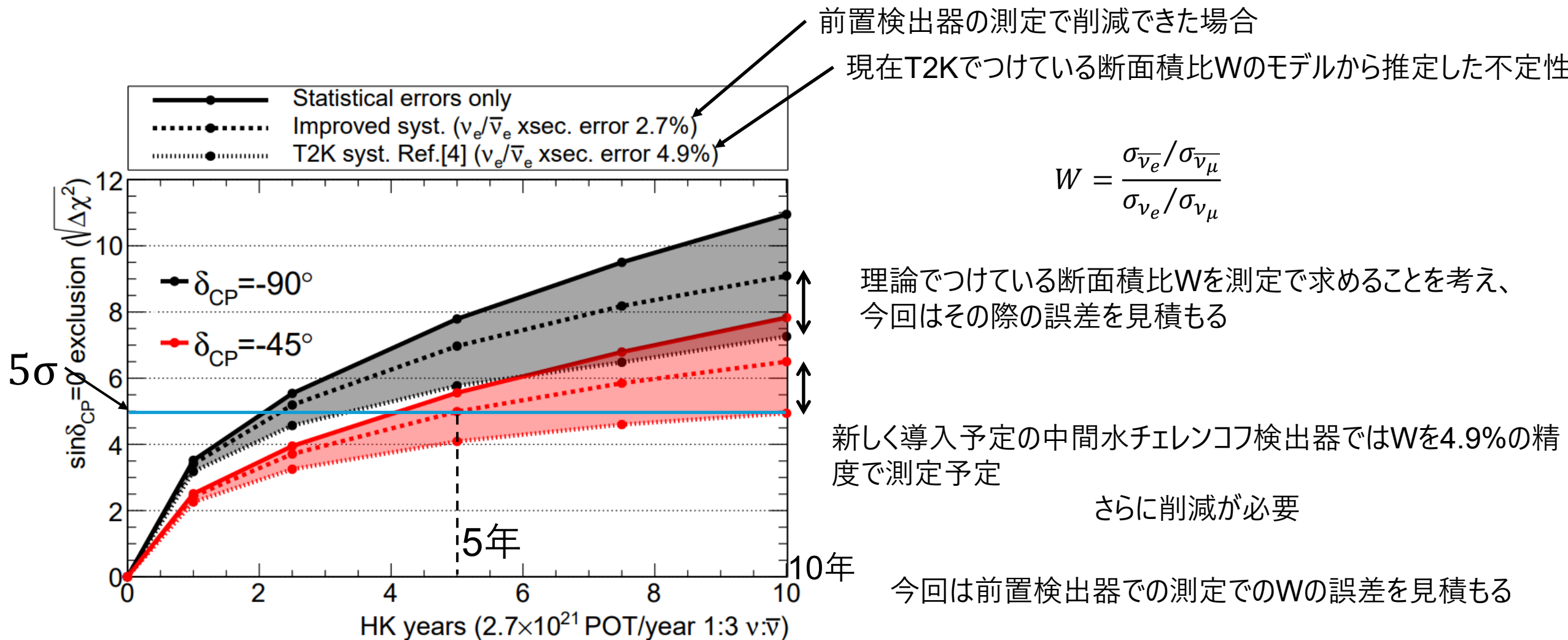
ニュートリノビーム

295 km

24pT1-3

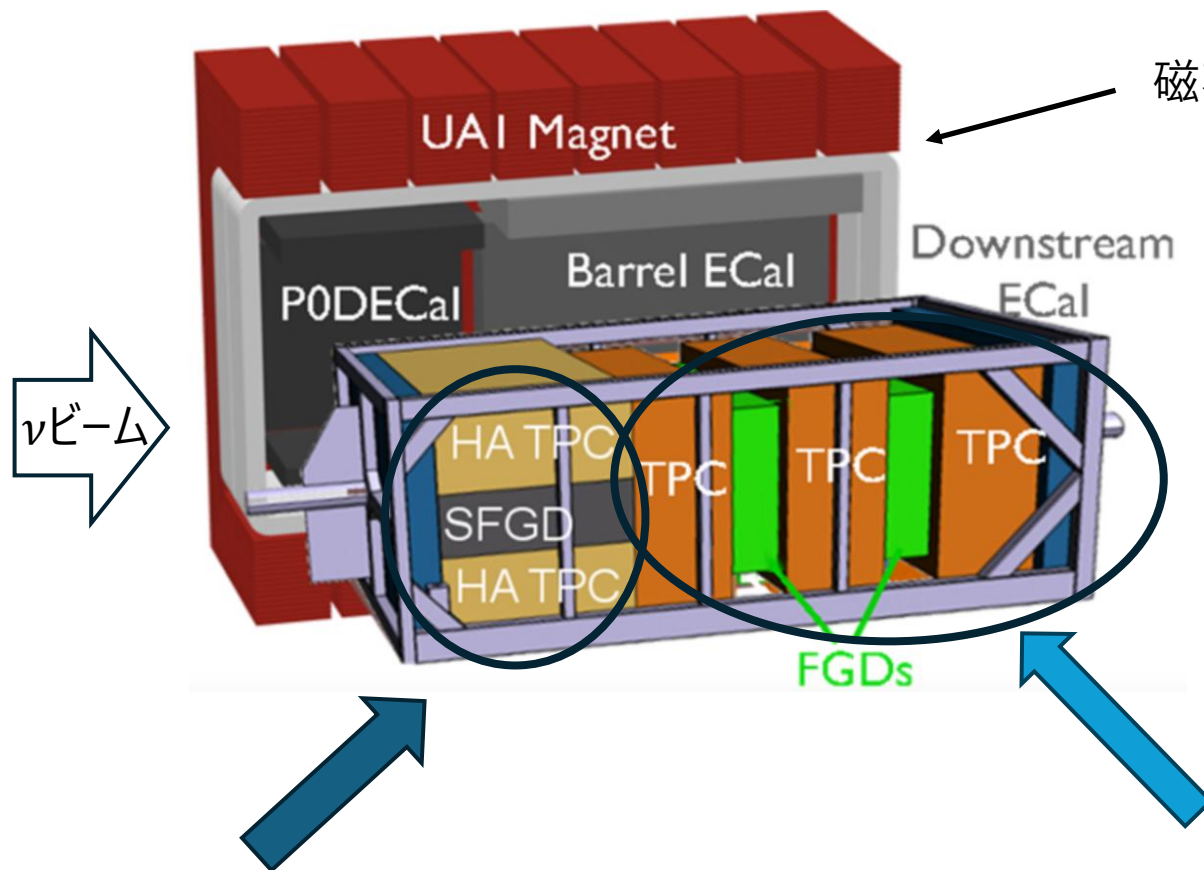
$$W = \frac{\sigma_{\bar{\nu}_e} / \sigma_{\bar{\nu}_\mu}}{\sigma_{\nu_e} / \sigma_{\nu_\mu}}$$

T2K、HKでのニュートリノ反応断面積二重比の不定性とCPの破れ感度



前置検出器(ND280)

ビームの280m下流にある前置検出器



磁石で磁場をかけることが可能

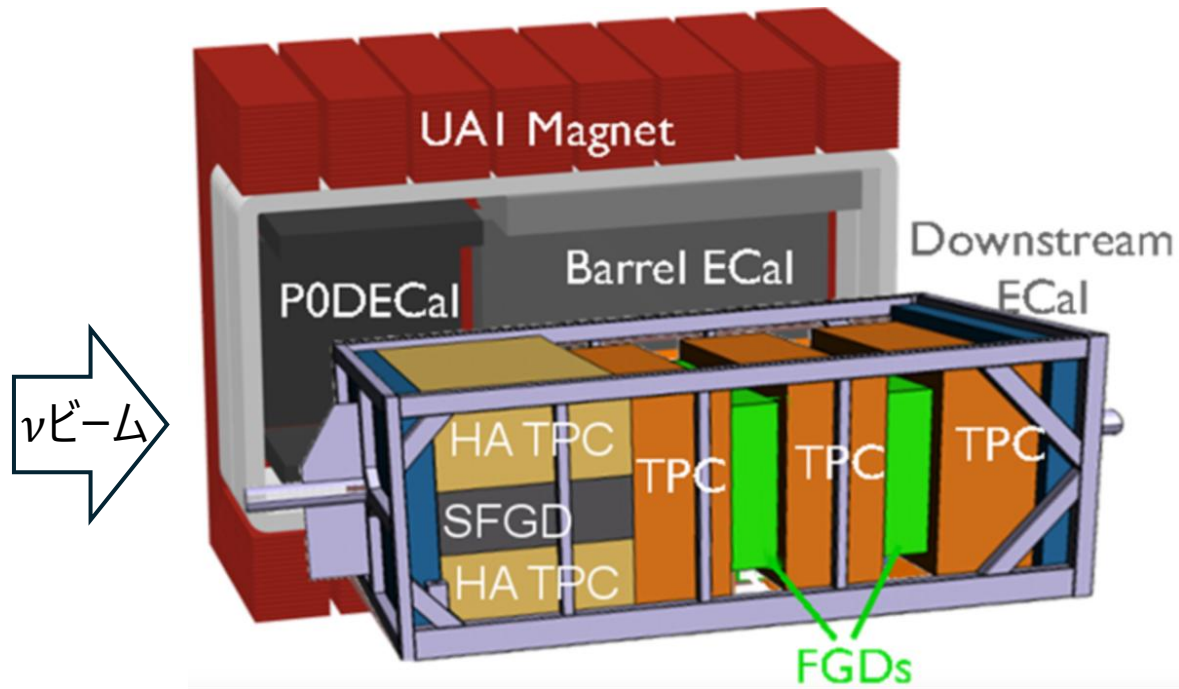
SFGD: シンチレーションキューブからなる標的兼トラッカー
FGD: シンチレーションバーからなる標的兼トラッカー

上流は2024年にアップグレードされ、今の形に

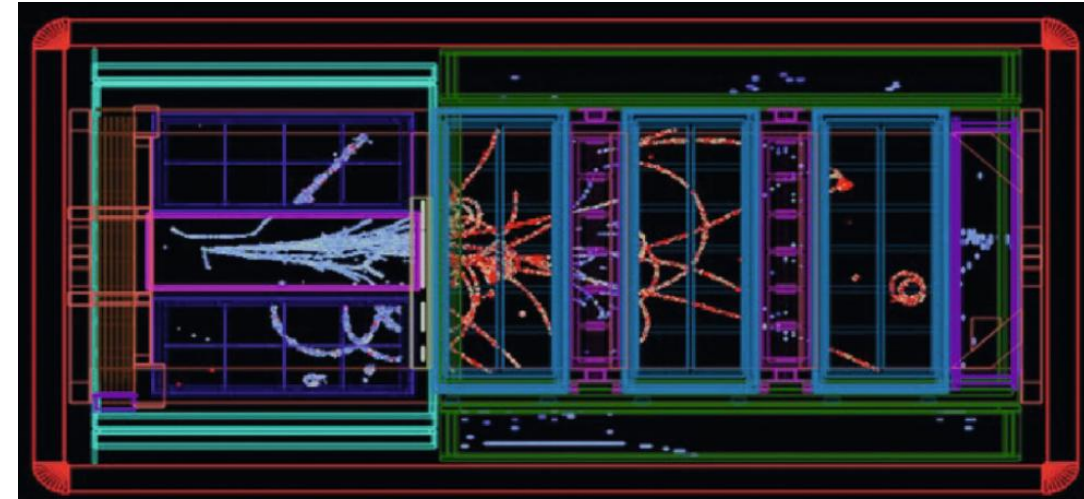
今回はHKに向けた下流のアップグレードを考える
系統誤差削減のためHKと同じ水標的を用いたい

前置検出器(ND280)

SFGD: シンチレーターキューブからなる標的兼トラッカー
FGD: シンチレーションバーからなる標的兼トラッカー



Event display

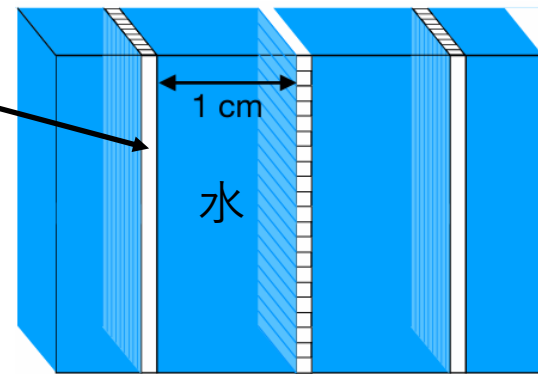


磁場によって荷電粒子の軌道が曲がる
→・向きによってcharge ID
・曲率からミューオンの運動量を測定

ν か $\bar{\nu}$ かによって出てくるレプトンの符号が変わるため、chargeIDによって ν 反応か $\bar{\nu}$ 反応か分けられる

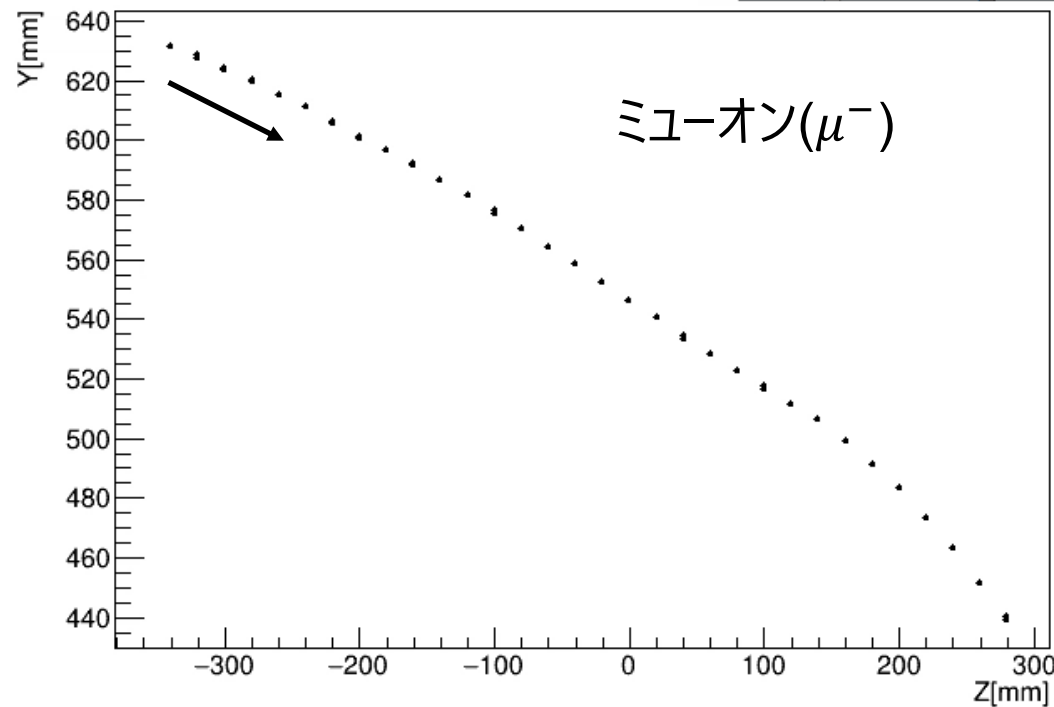
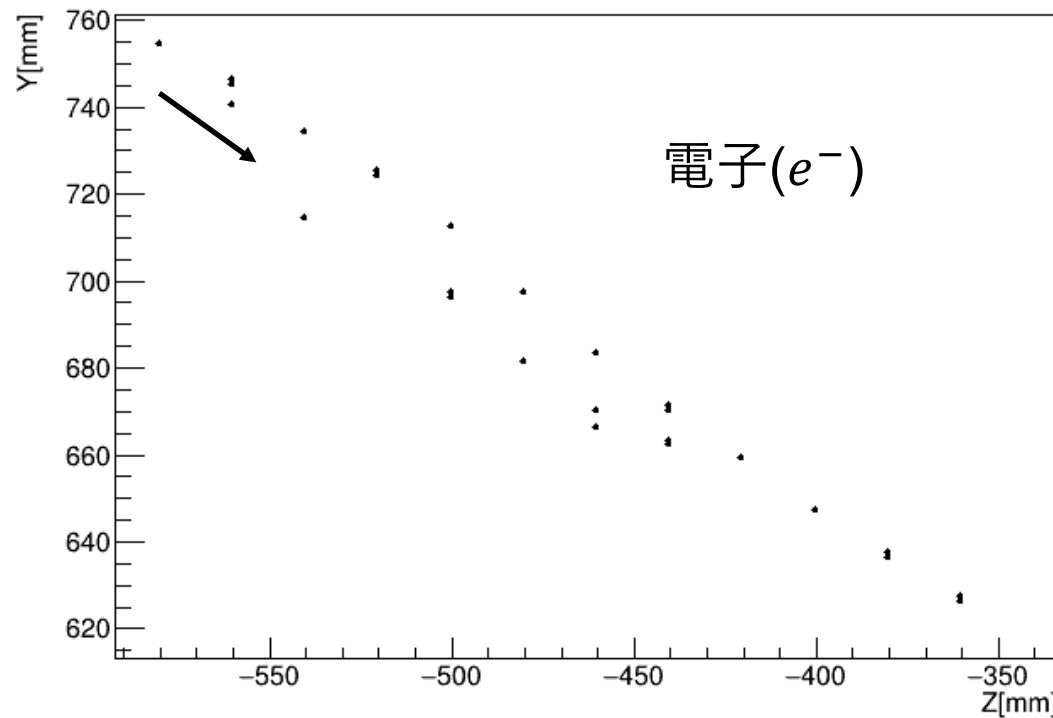
標的検出器でのcharge ID

シンチレーションファイバー



- 電子と μ のcharge ID

ND280の新型検出器候補のうちの一つでのparticle gunシミュレーションのevent display



電子はEM-shower、multiple scatteringの影響でcharge IDが難しい

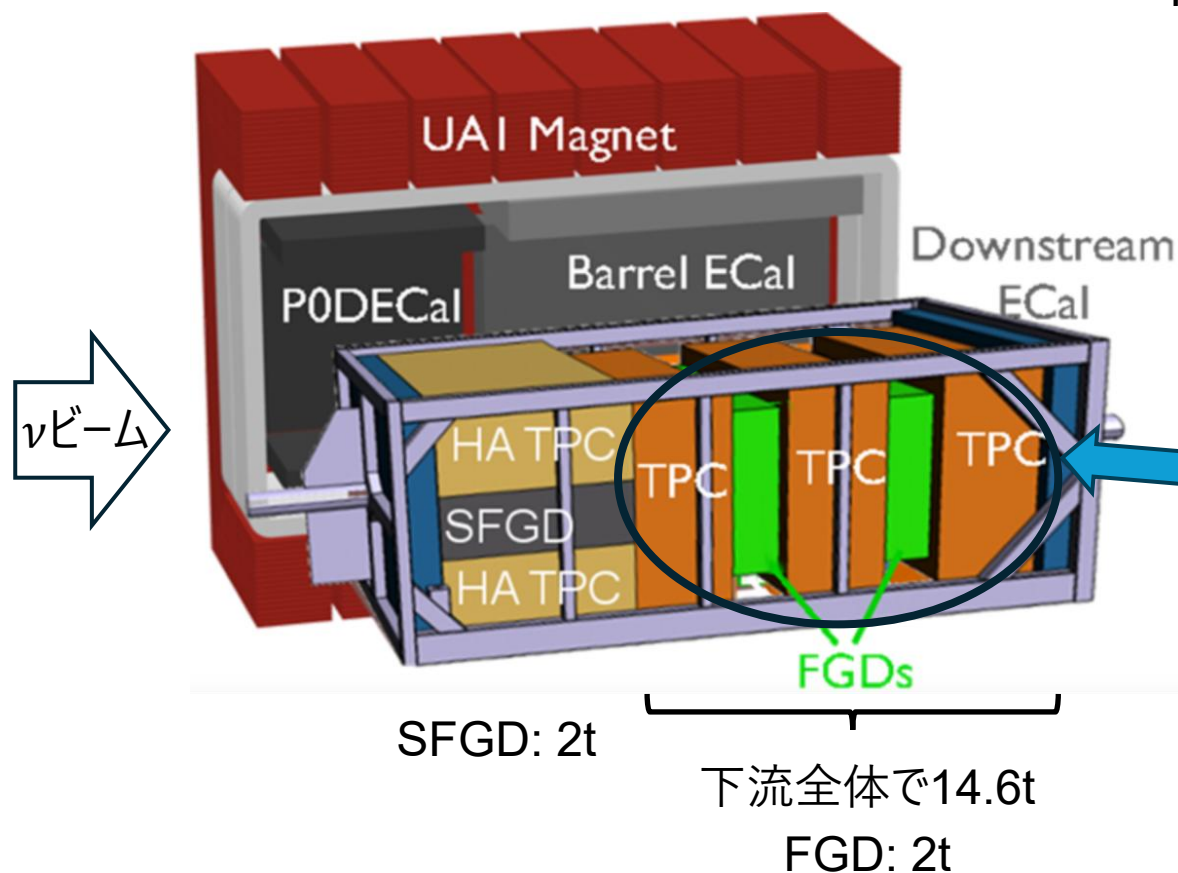
particle gun かつ trueのhit情報を使用しても、電子charge-ID rateは75%程度

電荷識別能力を上げるためにはTPCを入れる必要があるが、その分ニュートリノ反応標的的全質量が小さくなってしまふ

標的検出器でのcharge ID

Magnetの大きさで検出器の大きさが制限されてしまう

電荷識別能力を上げるためにはTPCを入れる必要があるが、その分ニュートリノ反応標的の全質量が小さくなってしまふ



今回はHKに向けた下流のアップグレードを考える
系統誤差削減のためHKと同じ水標的を用いたい

Best caseでの断面積比Wの誤差の見積もり

- HKで想定されるターゲットへの陽子照射数の半分を仮定、 ν モード： $\bar{\nu}$ モード=1：3* (HK実験で5年測った場合**)
- Charged current 反応でpionのないかつ再構成したニュートリノエネルギーが1GeV以下のイベントで統計数を見積もり

Best case での見積もりで目標が達成され得るか、以下を仮定して計算

* $\nu, \bar{\nu}$ イベントを同程度にするため

**ND下流のアップグレードはできたとしてHK開始から5年後

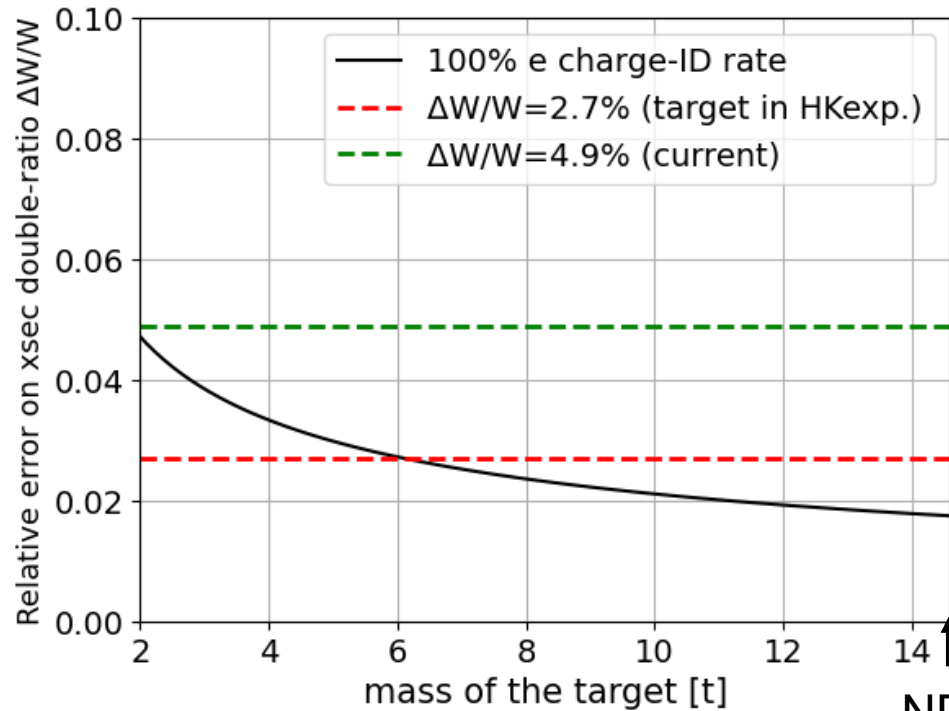
- Charge-ID rateは**100%**を仮定←
- (反)電子のefficiency, purity は**100%**を仮定←
- フラックスの誤差を0と仮定←

- Charge-ID rate:
電子の符号を見分ける能力。これが悪いと $\bar{\nu}$ イベントに ν イベントが混入してくる。

- efficiency:
 ν_e のback groundをcutした際にどの程度 ν_e イベントを残せるかの指標、 γ, μ などのback groundがある
約100倍の ν_μ の中から ν_e を選ぶ必要がある

- purity:
 ν_e のback groundをcutし、最終的に選ばれたイベントのうち、どの程度 ν_e イベントがあるかの指標

100% charge ID, efficiency, purity
→バックグラウンドの混入がない場合



NDの下流すべてで14.6t

Charge-ID rate が100%ではないとき

$\nu(\bar{\nu})$ モードのフラックスにも $\bar{\nu}(\nu)$ の混入がある

$\nu, \bar{\nu}$ では断面積が異なり $\bar{\nu}$ モードでの ν の混入が顕著

ここではWの一部である $\sigma_{\bar{\nu}_e}$ を考える

例として、完全にcharge-IDできる場合、 $\bar{\nu}_e$ 反応断面積 $\sigma_{\bar{\nu}_e}$ は

$$\sigma_{\bar{\nu}_e} = \frac{\bar{\nu}_e \text{ イベント}}{\bar{\nu}_e \text{ フラックス}}$$

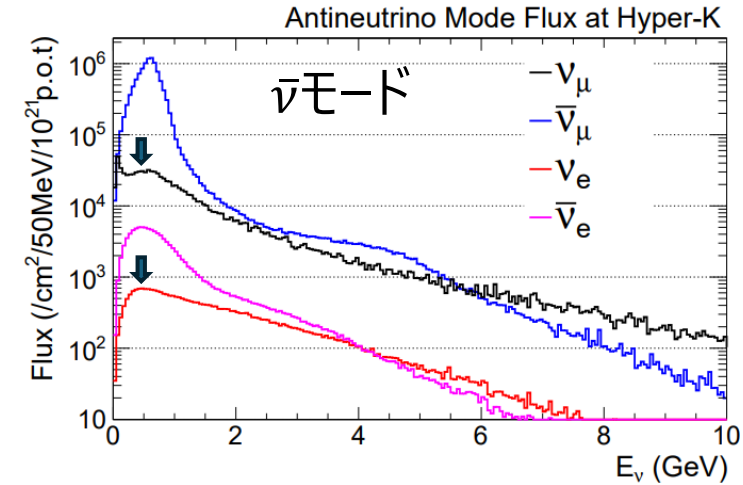
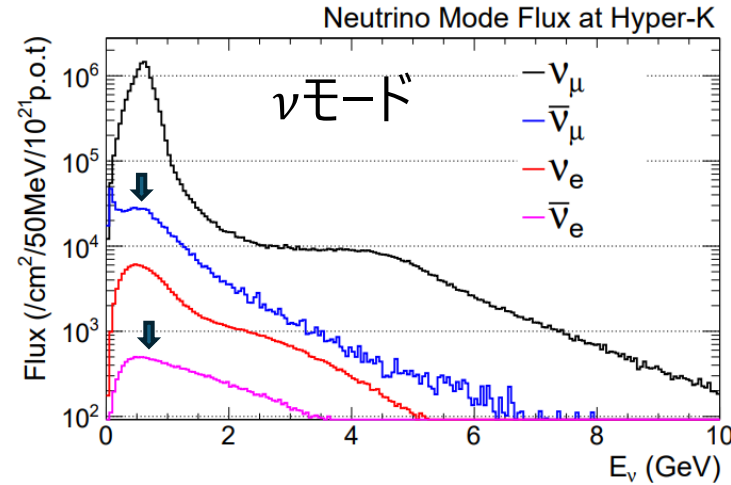
一方でcharge-ID rateが x の場合

$$\sigma_{\bar{\nu}_e} = \frac{\{(\bar{\nu}_e \text{ として観測されるイベント}) - (1-x)(\text{予想される}\nu_e \text{ イベント})\}/x}{\bar{\nu}_e \text{ フラックス}}$$

- $\bar{\nu}_e$ の観測数が減る
- ν_e の混入を引く必要がある

ν モードでの測定で推測

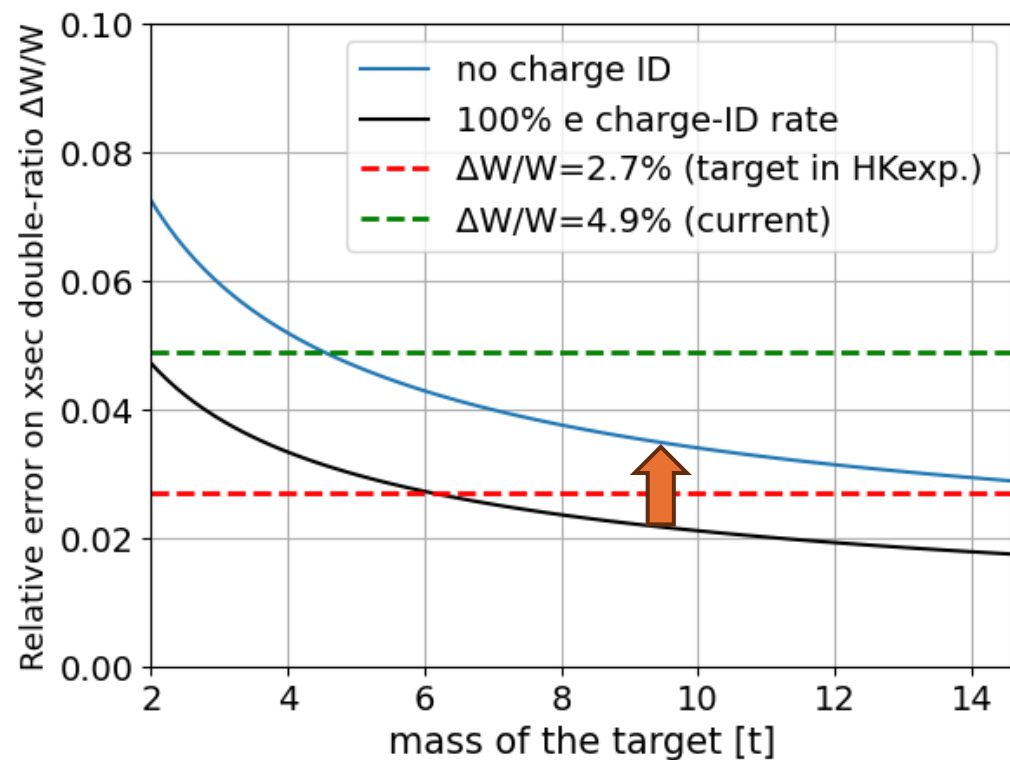
→ ν 測定の統計誤差、フラックスの誤差、フラックスの形状の差による断面積補正の誤差



Charge-ID が全くできないときの断面積比 W の誤差の見積もり

Charge ID が全くできない場合を以下を仮定して計算

- Charge ID はできないとする←
- (反)電子のefficiency, purity は100%を仮定
- フラックスの誤差を0と仮定



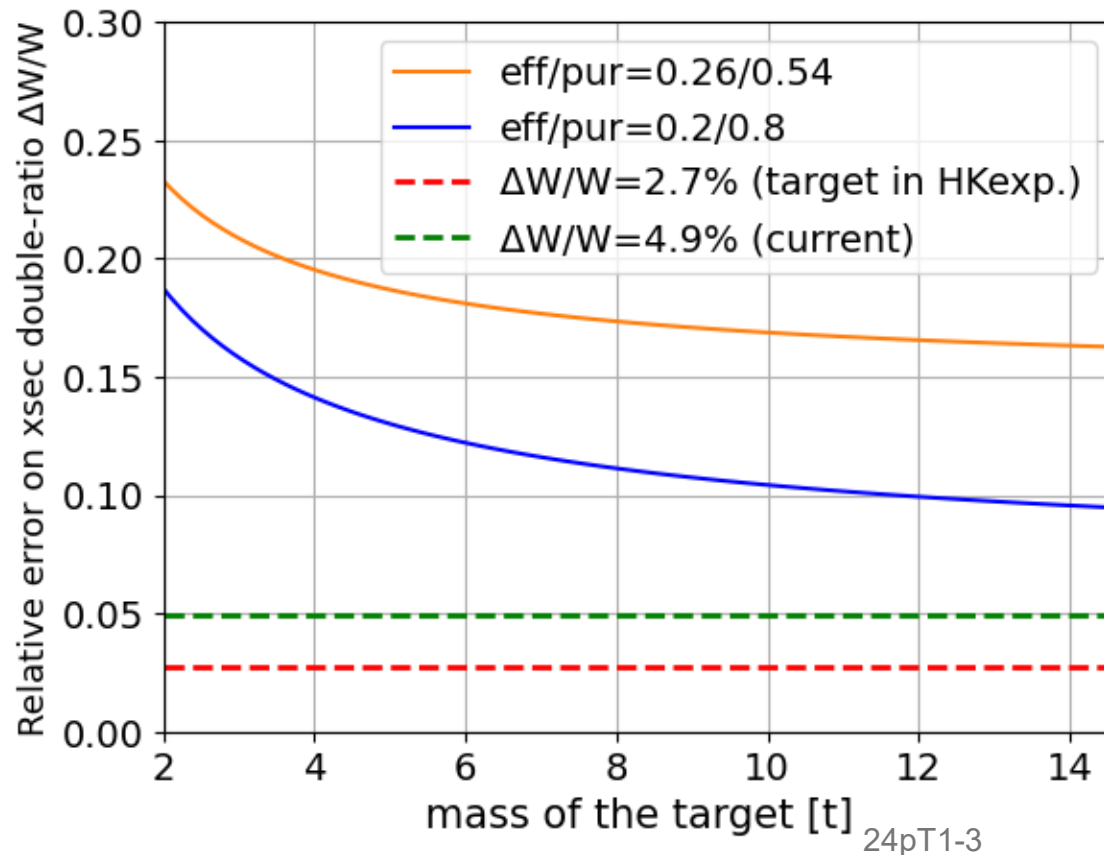
Charge ID ができないことによって、1~2%程 W の誤差が大きくなる

現実的な見積もり

現在の測定やシミュレーションで予想される条件での見積もり

- (反)電子のefficiency, purityは
 - FGD(現在のND下流側)の**26%, 54%**
 - SFGD(現在のNDの上流側)の**20%, 80%**を仮定
- Charge IDはできないとする
- フラックスの誤差を**現在のT2Kの共分散行列**で見積もり←

今回、purityの影響を計算する際に、バックグラウンドイベントに10%の誤差を仮定



FGDの性能

SFGDの性能

バックグラウンドの10%の系統誤差のため、purityの改善による影響が大きく出ている

ニュートリノフラックスの誤差について

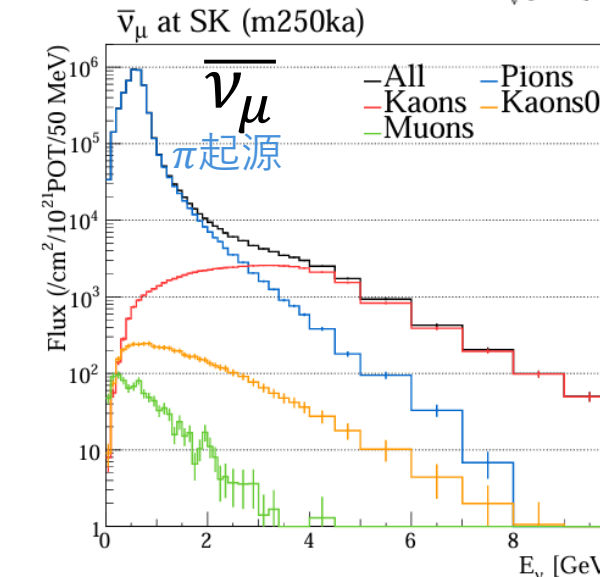
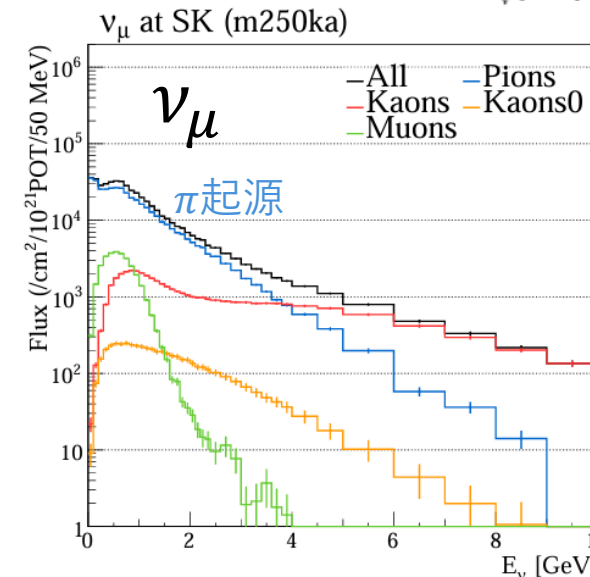
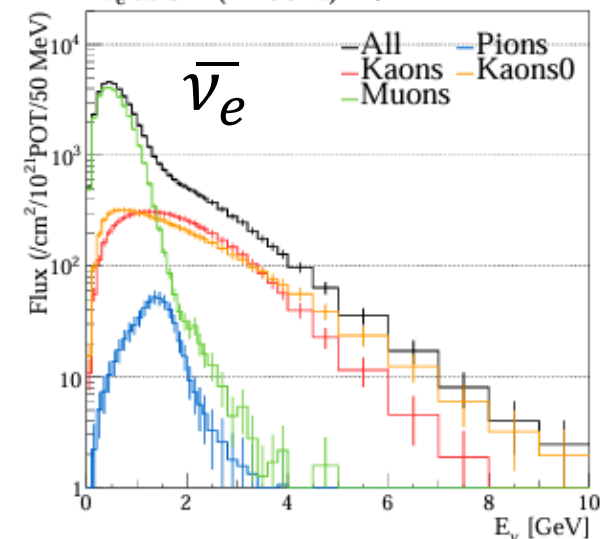
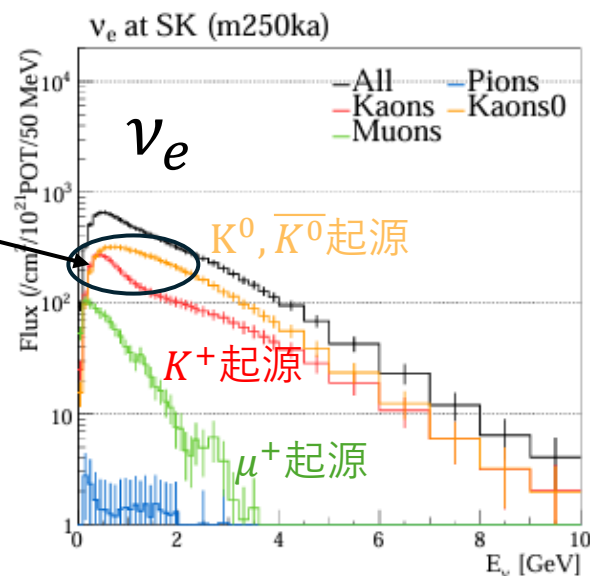
誤差の大きい反ニュートリノモードでの ν_e フラックスを考える

反ニュートリノモードでの電子ニュートリノはKによるもの

ミュオンニュートリノの測定からは制限できない

反ニュートリノモードでのニュートリノフラックス

by T2K collaboration

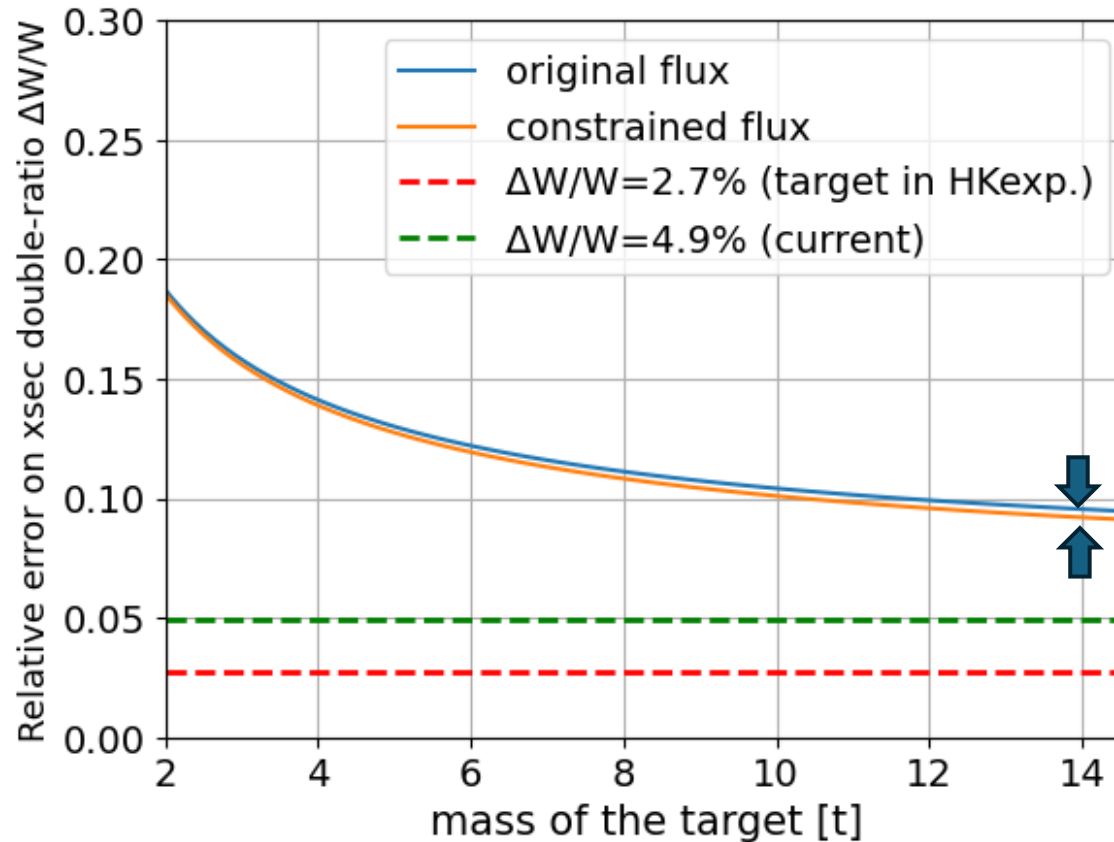


ハドロン相互作用を測る外部実験の改良などで誤差が小さくなり得る部分を考える

Flux誤差が改善された場合

ハドロン相互作用を測る外部実験の改良などで誤差が小さくなった場合

- (反)電子のefficiency, purity はSFGD(現在のND上流側)の20%, 80%を仮定
- Charge IDはできないとする
- フラックスの誤差を現在のT2Kの共分散行列よりも抑えて見積もり←

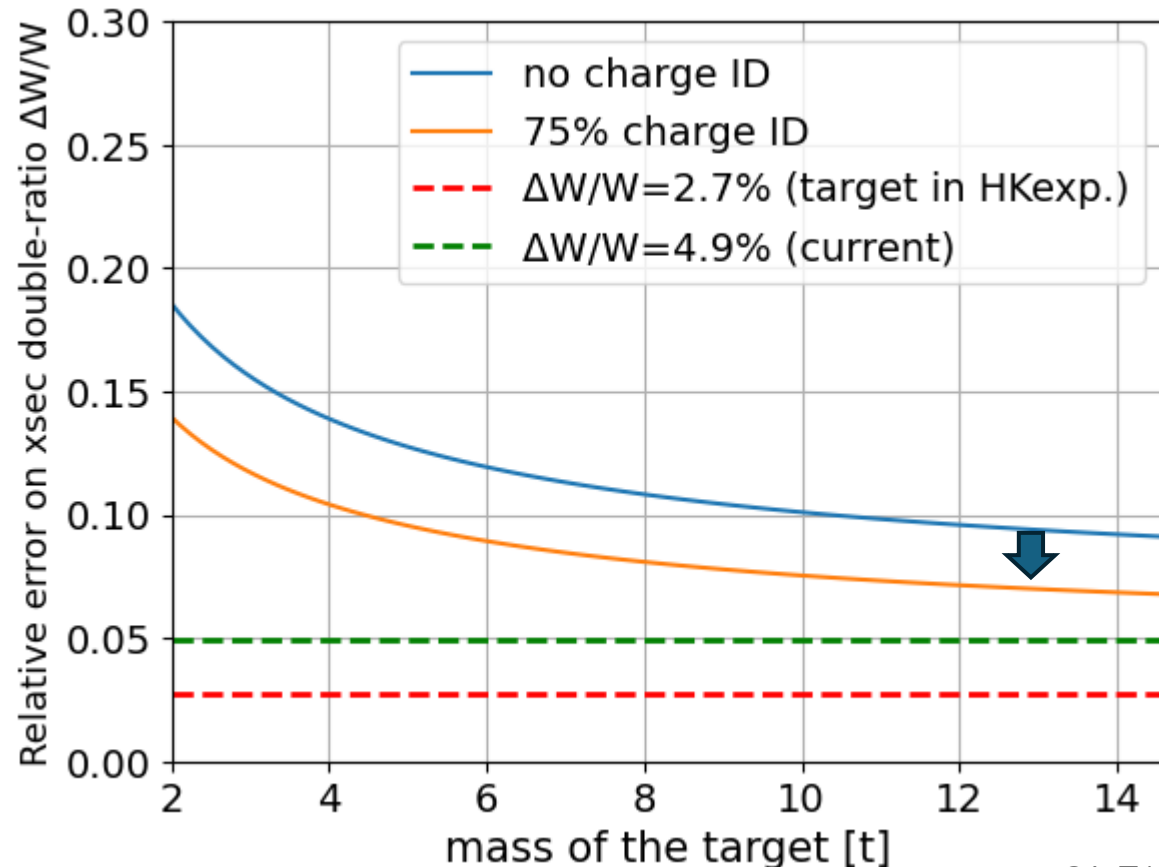


最大で~0.34%の削減

電荷識別能力の有無

さらにcharge ID できる場合を考える

- (反)電子のefficiency, purity はSFGD(現在のND上流側)の20%, 80%を仮定
- Charge IDは75%と仮定←
- フラックスの誤差を現在のT2Kの共分散行列よりも抑えて見積もり



ND280の新型検出器候補のうちの一つでのparticle gun シミュレーションで見積もった75% charge IDを仮定

~3%の削減

6.8%

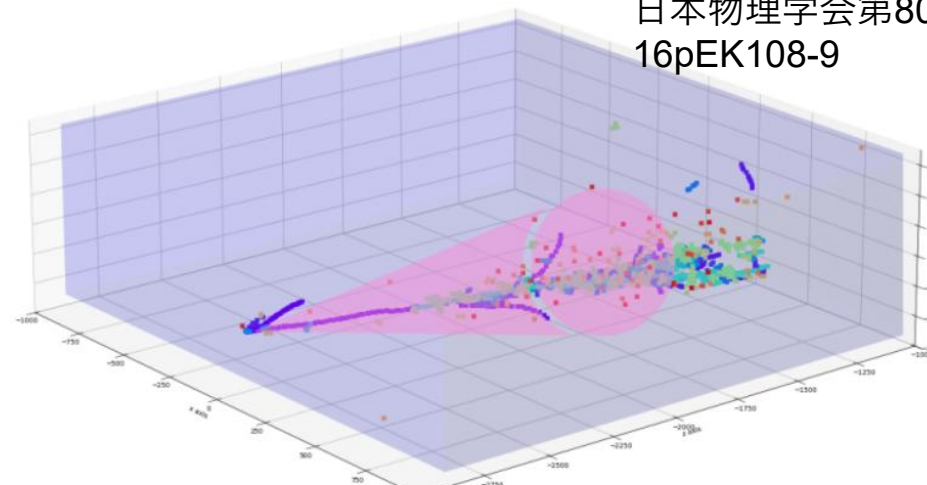
(stat. 4.5%, flux syst. 3.0%, back ground syst. 4.0%, other syst. 0.4%)

ν_e selection でのback ground purityの影響

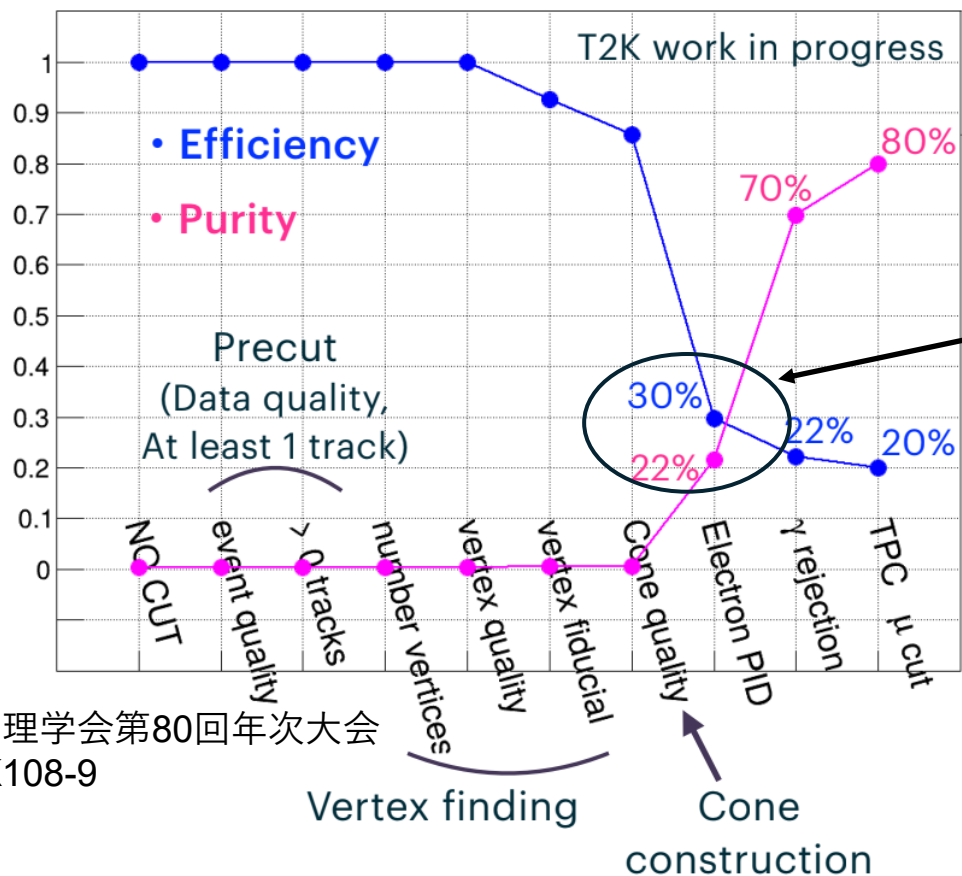
SFGDでのefficiency

SFGDの性能: efficiency **20%**, purity 80%

SFGDでは電子をIDするためにEM-showerを再構成



Typical ν_e CCQE event in MC.

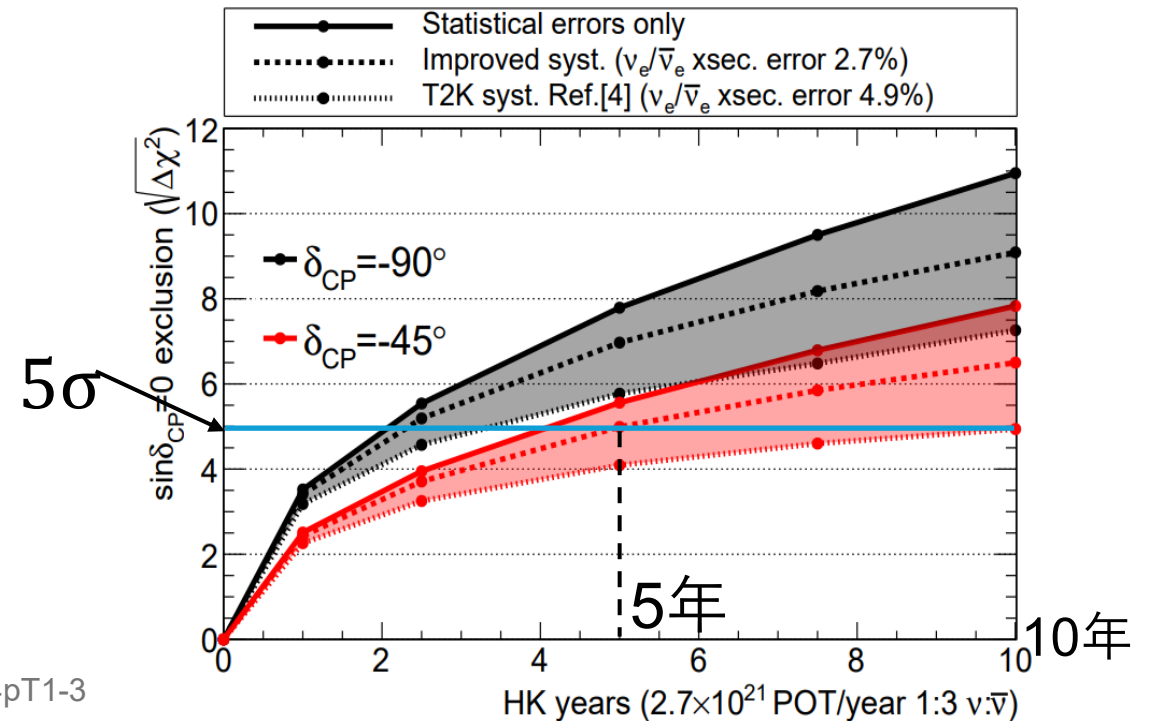


このEM-shower like(e)と他粒子(μ, p, π)の分離で多くの ν_e イベントが捨てられ、efficiencyが低下

→ 新型検出器では $e/\mu, p, \pi$ の分離性能がいい検出器が要求される

まとめ

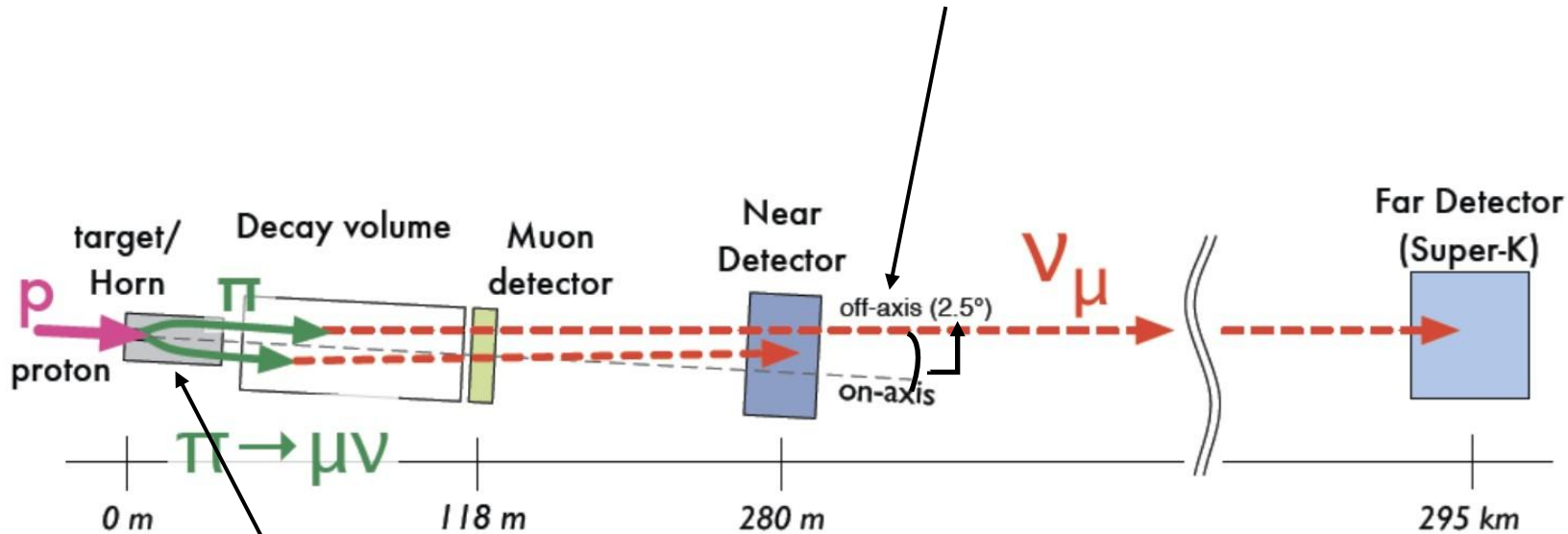
- CP対称性の破れ測定に重要なニュートリノ断面積二重比WのND280による測定精度の見積もりを行った
- Purity80%, Efficiency20%、電荷識別割合75%、14.6トン、5年の測定でWの誤差~6.8%を達成できる
このためには今回考慮した有効体積の増加に加え、efficiency、purity、電荷識別能力の向上が必要
- これらの性能は提案されている新型検出器案、およびTPCを組み合わせた場合において今後見積もりが必要
- 中間検出器も組み合わせた精度の見積もりも必要



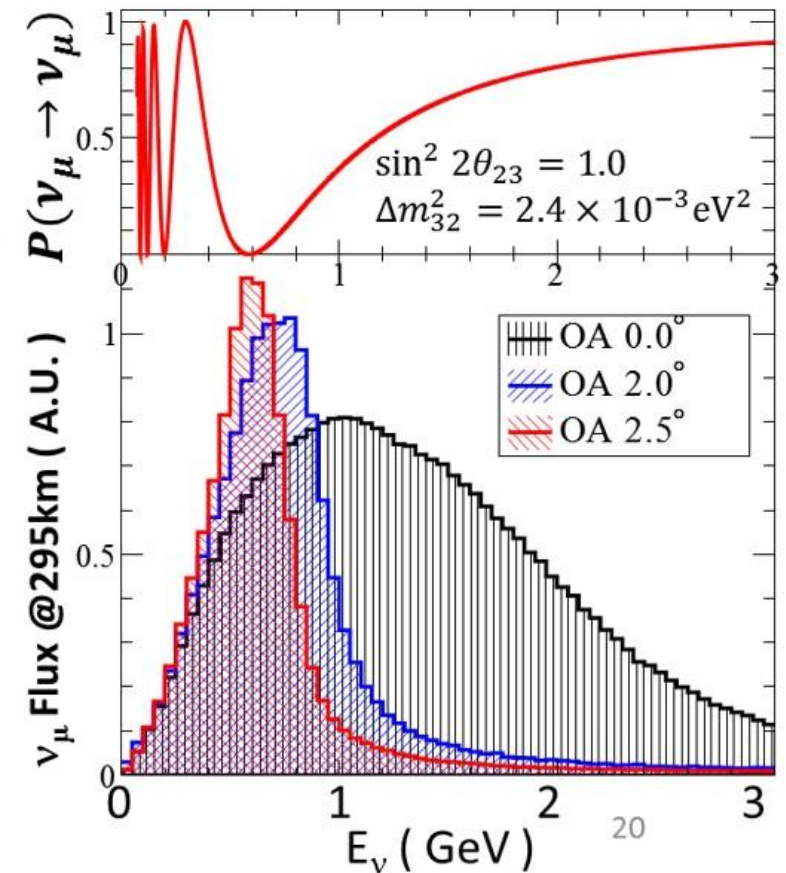
Back up

J-PARCで作られるニュートリノビーム

- ビーム中心に対する角度によってニュートリノフラックスの形が変わる
- ビーム中心から2.5°の方向のニュートリノビームが振動確率最大のエネルギーにピークを持つ



- ホーン電流を変えることで集束させるハドロンの符号を選び、 ν , $\bar{\nu}$ のどちらを作るかを選択している

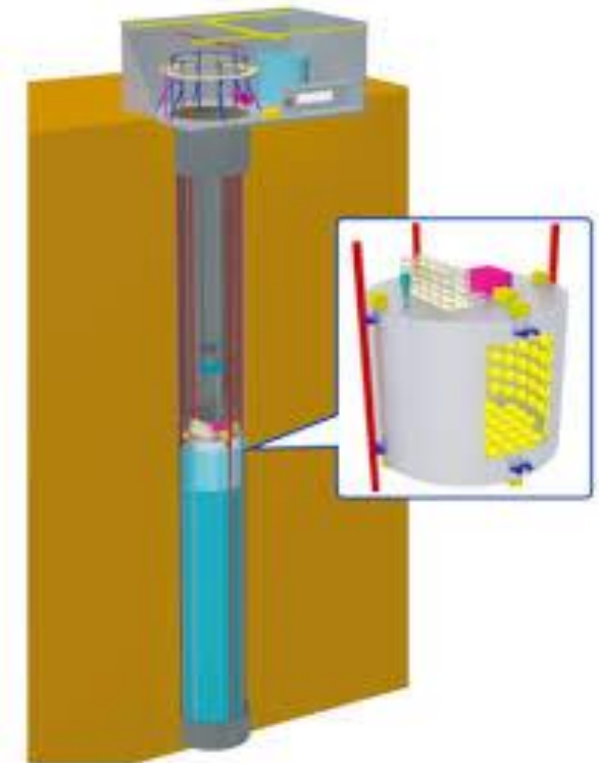
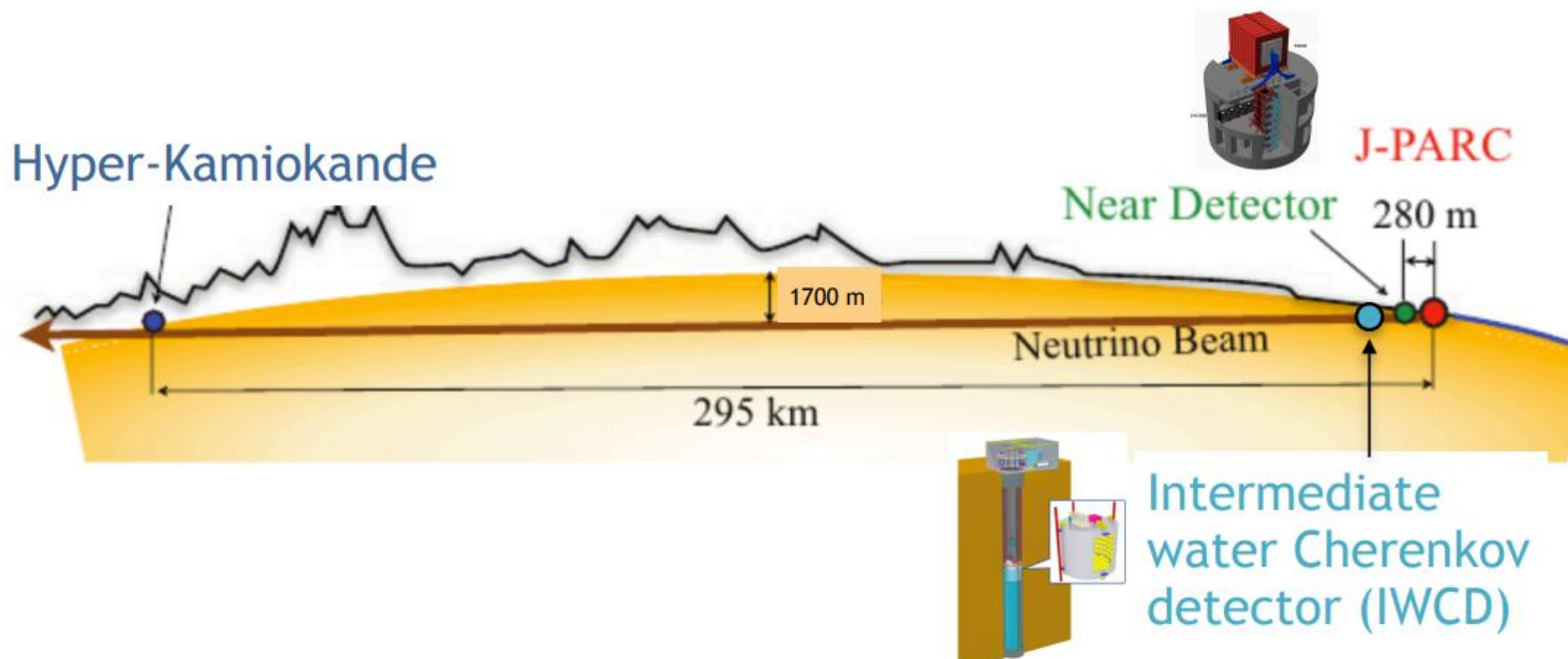


中間検出器(IWCD)

中間検出器：ターゲットから約1km先にある水チレンコフ検出器
内槽は直径7m、高さ8mの円筒(300t)

上下に動くことでさまざまなエネルギーのニュートリノを測定可能

HKでの系統誤差削減を目指す



ニュートリノ、反ニュートリノの反応断面積比

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の確率 P と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の確率 \bar{P}

$$\begin{cases} P = \frac{\phi_e}{\phi_\mu} = \frac{N_e/\sigma_e}{N_\mu/\sigma_\mu} \\ \bar{P} = \frac{\phi_{\bar{e}}}{\phi_{\bar{\mu}}} = \frac{N_{\bar{e}}/\sigma_{\bar{e}}}{N_{\bar{\mu}}/\sigma_{\bar{\mu}}} \end{cases}$$

σ_l : xsec of ν_l
 $\sigma_{\bar{l}}$: xsec of $\bar{\nu}_l$
 ϕ_l : flux of ν_l
 $\phi_{\bar{l}}$: flux of $\bar{\nu}_l$
 P_0 : probability of $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$
 \bar{P}_0 : probability of $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$
 P : probability of $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$
 \bar{P} : probability of $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$

振動確率の差

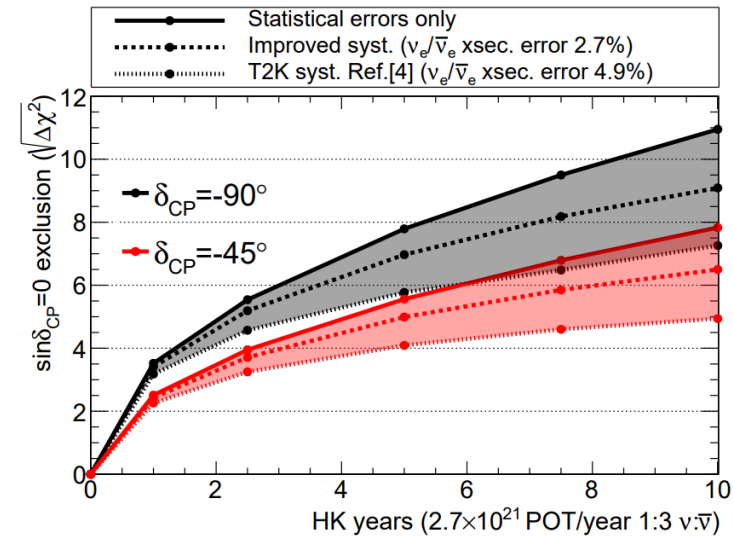
$$P - \bar{P} = \frac{N_e/\sigma_e}{N_\mu/\sigma_\mu} - \frac{N_{\bar{e}}/\sigma_{\bar{e}}}{N_{\bar{\mu}}/\sigma_{\bar{\mu}}} = \frac{\sigma_\mu}{\sigma_e} \left(\frac{N_e}{N_\mu} - \frac{N_{\bar{e}}}{N_{\bar{\mu}}} \cdot \underbrace{\frac{\sigma_{\bar{\mu}}/\sigma_{\bar{e}}}{\sigma_\mu/\sigma_e}}_{W^{-1}} \right)$$

$P - \bar{P}$ が0かどうかは W によるため W の誤差が CP 測定に効いてくる

$$W = \frac{\sigma_{\bar{\nu}_e}/\sigma_{\bar{\nu}_\mu}}{\sigma_{\nu_e}/\sigma_{\nu_\mu}}$$

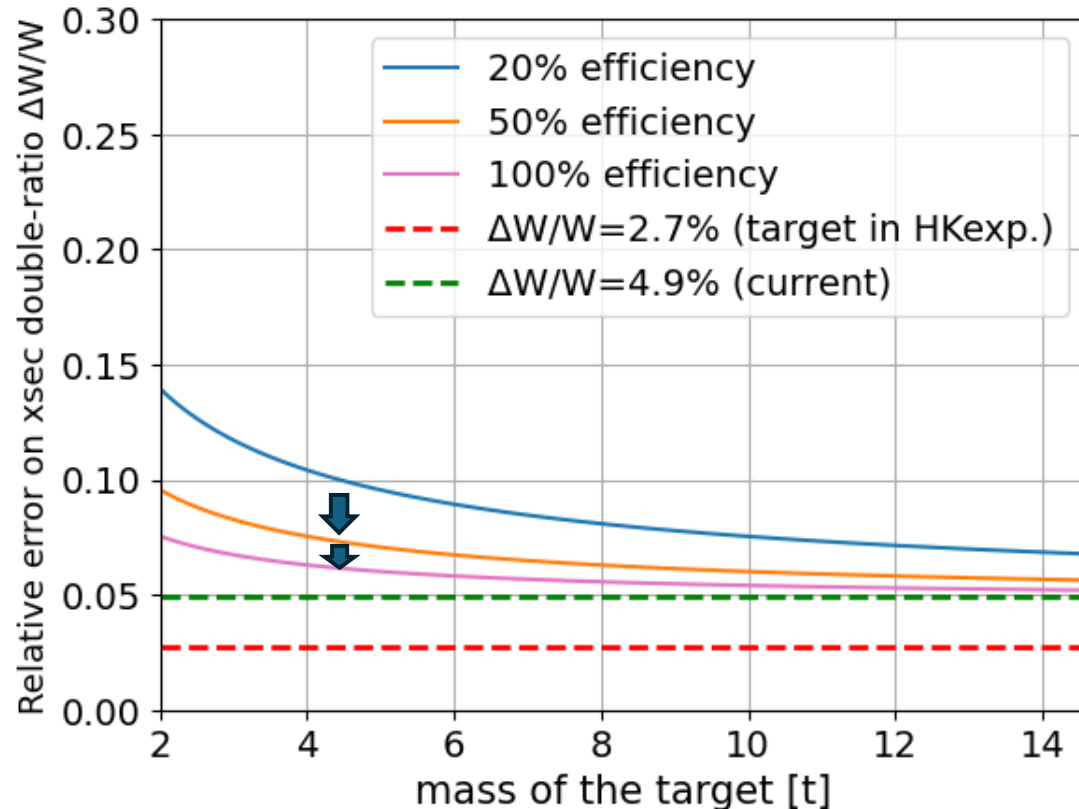
← 反ニュートリノモードで測定
 ← ニュートリノモードで測定

以降、 W の誤差の見積もりについて考える



Efficiency の改善

- (反)電子のpurity はSFGD(現在のND上流側)の80%を仮定
- Efficiencyを改善した場合 ← 統計増加に相当
- Charge IDは75%と仮定
- フラックスの誤差を現在のT2Kの共分散行列よりも抑えて見積もり

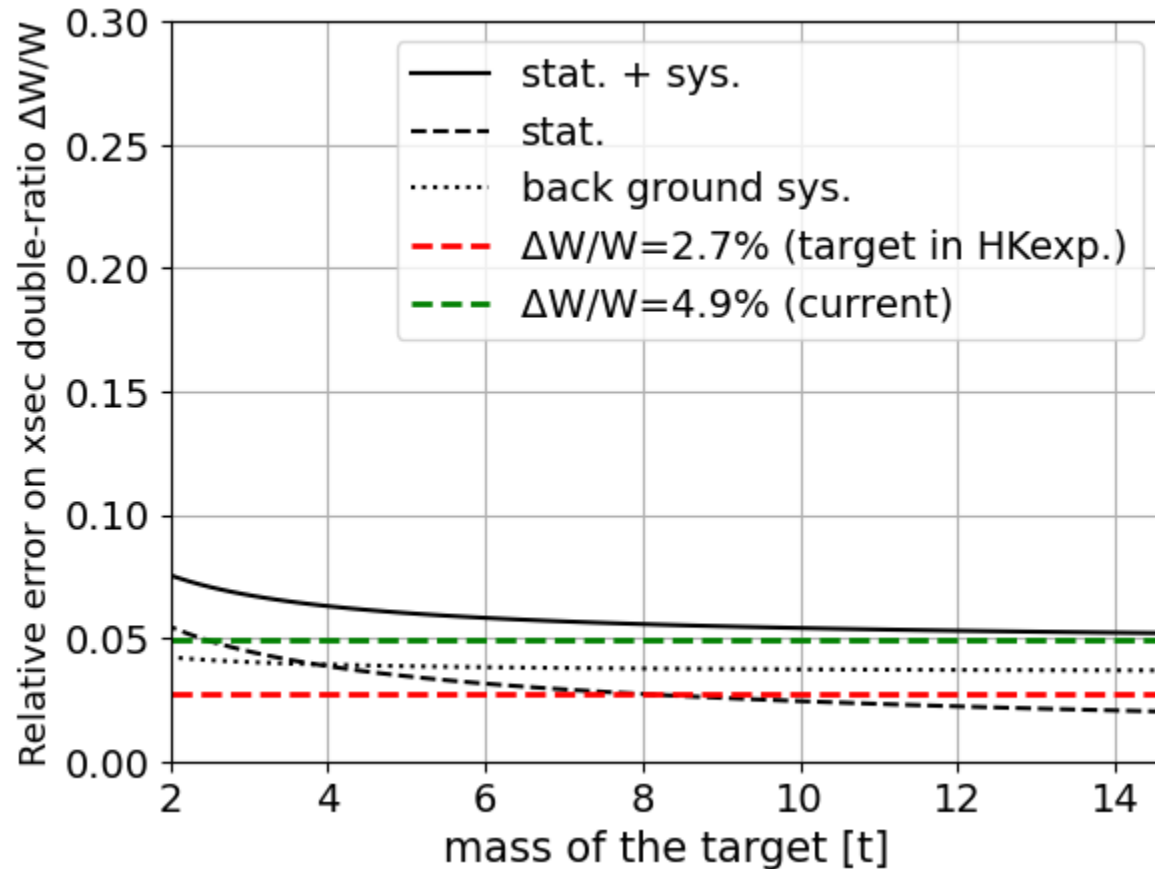


5.2%
(stat. 2.0%, flux syst. 3.0%, **back ground syst. 3.7%**,
other syst. 0.4%)

統計増加によって統計誤差が小さくなるも、back ground
のsyst.が支配的になり、頭打ちに

バックグラウンド系統誤差の影響

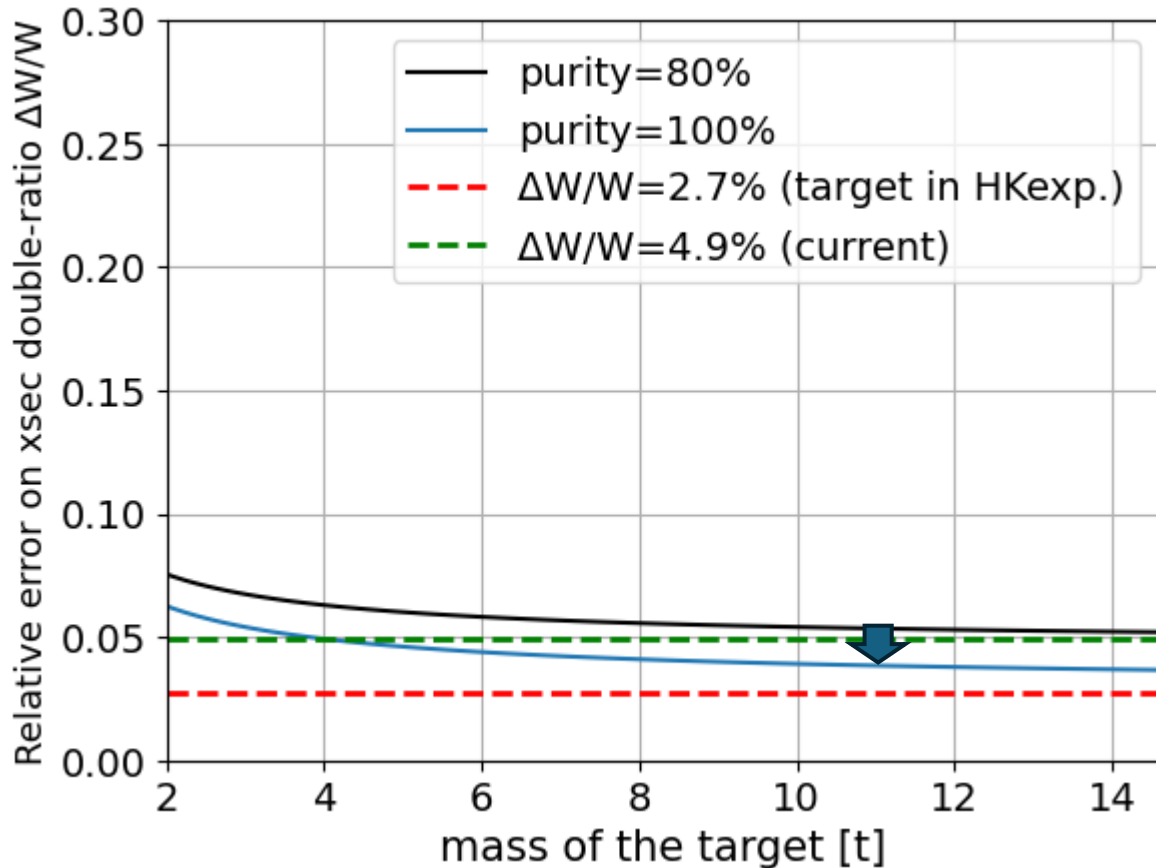
Efficiency=100%, purity=80%, 75% charge ID



Massを大きくすると統計誤差は下がるが、バックグラウンドの系統誤差で頭打ちになる

Purityの改善について

efficiency=100%, charge ID 75%



- ν_e selectionでのback ground 除去の難しさ

$\nu_\mu:\nu_e = 100:1$ であり、back ground除去の精度が重要になる

例えば

back groundのcutにおいて90%正しくIDでき、10%間違ふとき

ν_e として選択されたイベントの内訳は $\nu_\mu:\nu_e \sim 10:1$

99%正しくIDできてやっと、 $\nu_\mu:\nu_e \sim 1:1$