
Чувствительность ближнего детектора ND280 эксперимента T2K к тяжёлым нейтрино в распадах заряженных каонов и пионов

Горшанов К.Ю., Измайлов А.О.

Институт ядерных исследований Российской академии наук

Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН
«Физика фундаментальных взаимодействий»

Новосибирск, 10 Марта, 2026

Физическая мотивация

Новая физика за пределами СМ:

- $m_\nu \neq 0$
- Барионная асимметрия Вселенной
- Тёмная материя

ν MSM-модель [1,2]:

- 3 правых нейтрино $N_I, I = \{1,2,3\}$
- ν & N_I – Майорановские частицы
- $m_{N_1} \sim keV$ может быть тёмной материей
- $m_{N_{2,3}} \sim MeV - GeV$ может вызвать бариогенезис

Цветовое собственное состояние как комбинация лёгких (ν_i) и тяжёлых (N_I) массовых собственных состояний:

$$\nu_\alpha = \sum_{i=1}^3 V_{\alpha i}^{PMNS} \nu_i + \sum_{I=1}^n \Theta_{\alpha I} N_I \quad (\alpha = e, \mu, \tau; i = 1,2,3; I = 1,2,3)$$

- Предполагаем $M_2 \sim M_3 \equiv M_N, |U_\alpha|^2 = \sum_{I=\{2,3\}} |\Theta_{\alpha I}|^2$

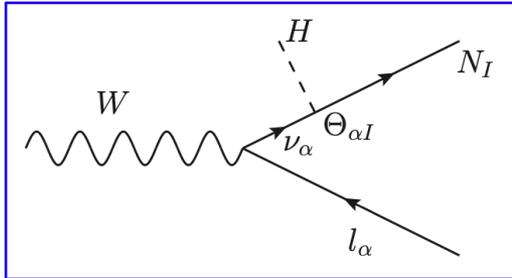
Методы поиска тяж. нейтрино:

Изучение кинематики распада мезонов ($M^\pm \rightarrow l_\alpha^\pm N$)
 Применено в E949, NA62 и др.
 Чувствительность к U_α^2

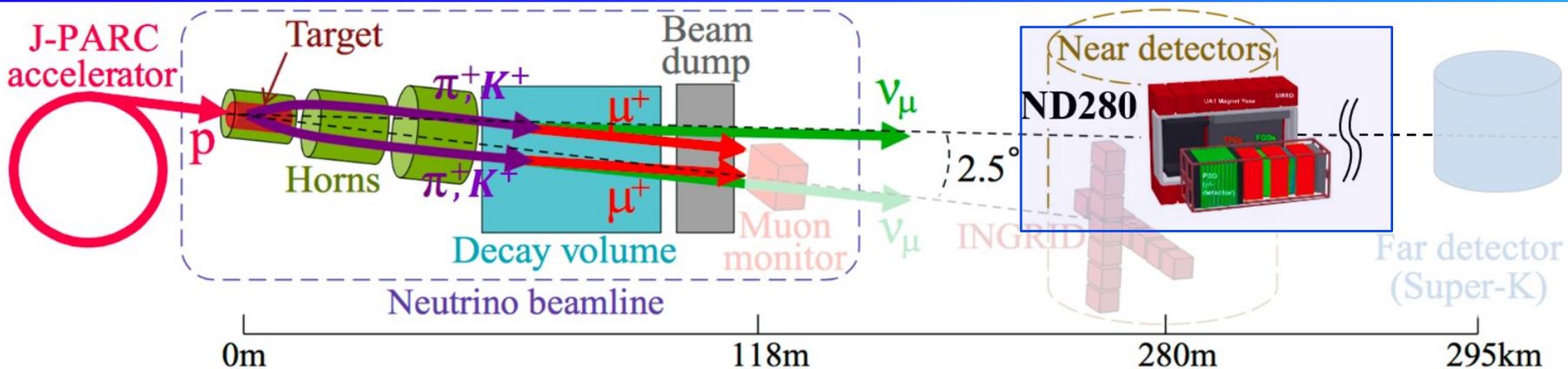
Поиск распадов тяж. нейтрино в детекторе, изучение кинематики дочерних частиц
 CERN-PS-191;
нейтринные эксперименты
 Чувствительность к $U_\alpha^2 U_\beta^2$

Тяжёлые нейтральные лептоны, или тяжёлые нейтрино

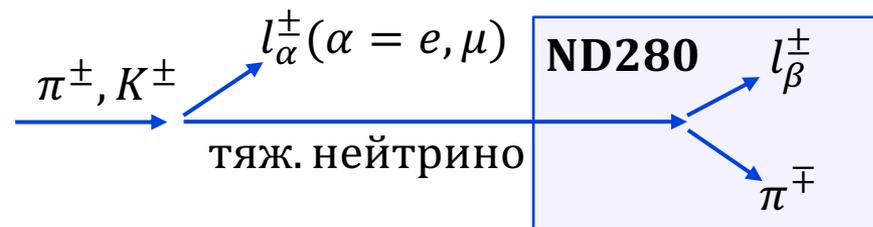
Фейнмановское представление



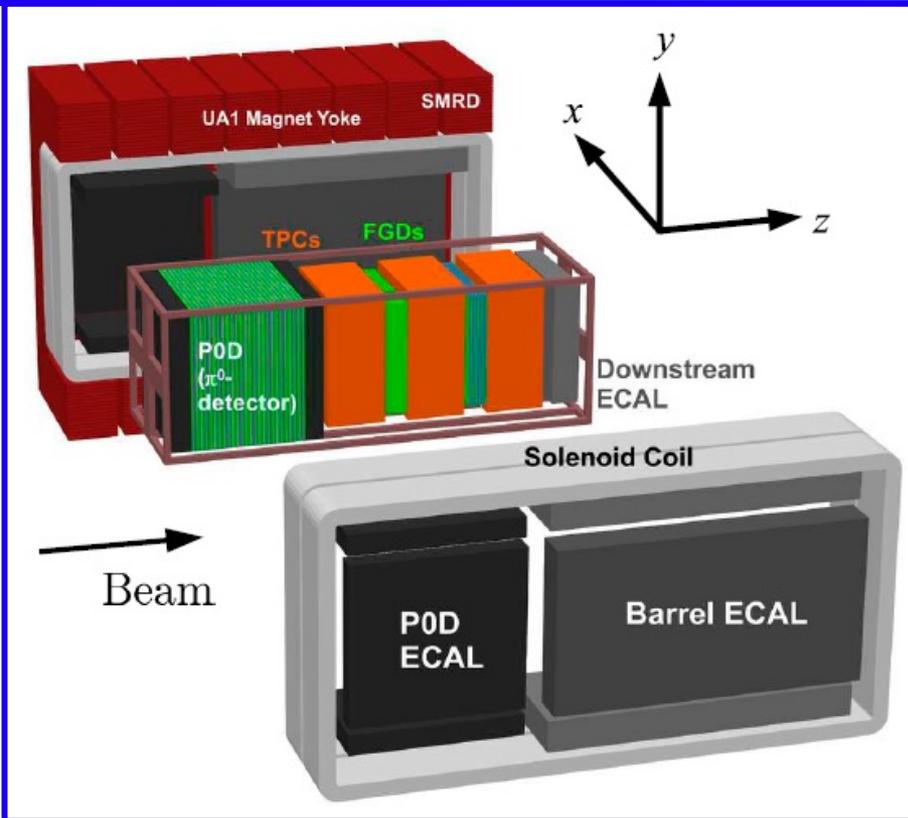
Эксперимент T2K



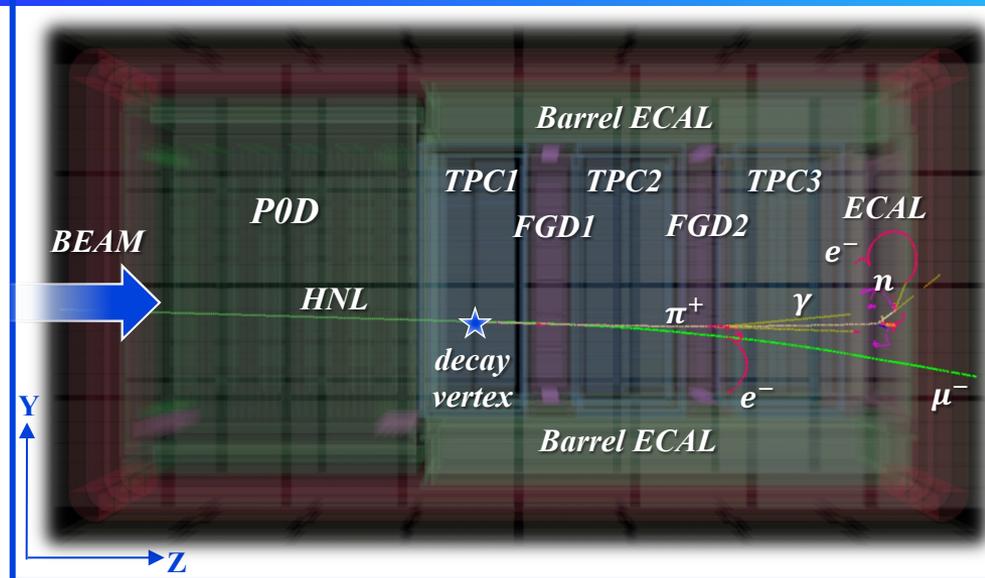
- Tokai-to-Kamioka (T2K) [3] – нейтринный эксперимент с длинной базой.
- Главная цель – изучение осцилляций ν , поиск лептонного CP –нарушения.
- Ближний детектор ND280 расположен под углом 2.5° к пучку ν ($\overline{E}_\nu = 0.6 \text{ GeV}$).
- Ускорительный эксперимент на протонном пучке с энергией 30 ГэВ в J-PARC.
- Нейтринный пучок от распадов π - и K -мезонов.
- π - и K -мезоны фокусируются магнитными горнами для создания пучка ν_μ ($\overline{\nu}_\mu$).
- Исследуем распады тяж. нейтрино в ближнем детекторе ND280:



ND280 и пример события с тяжёлым нейтрино



- UA1 магнит – дипольное маг. поле 0.2 Т
- POD – π^0 детектор
- ECAL – электромагнитный калориметр



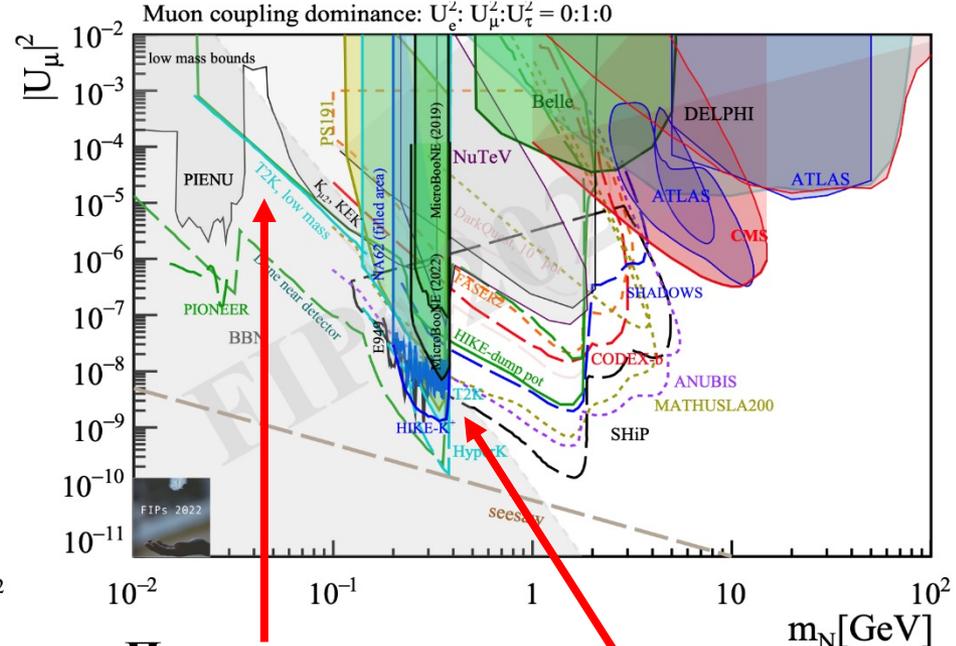
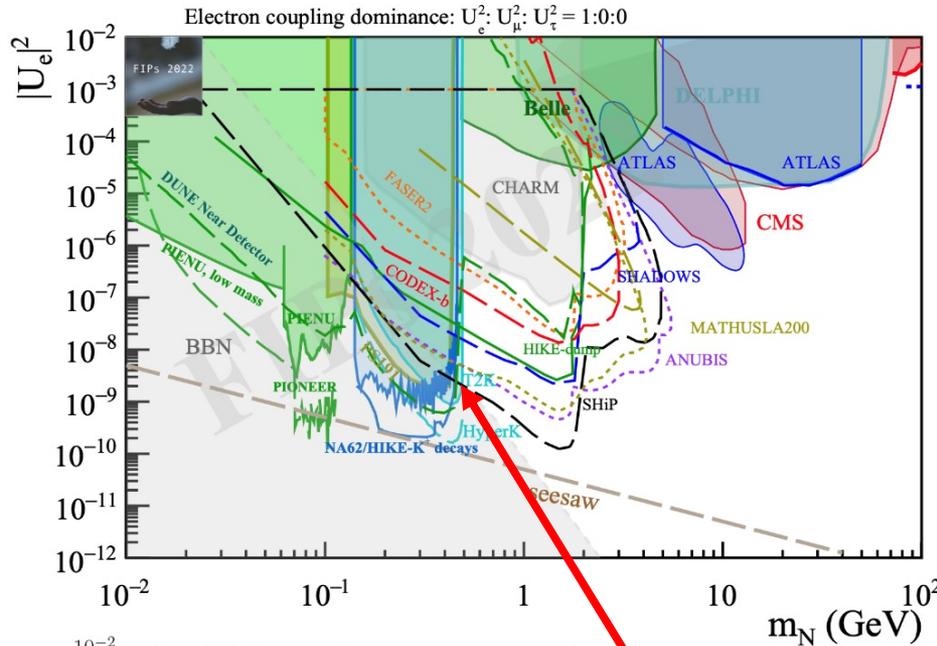
Моделирование распада тяж. нейтрино в ND280

- TPCs – аргоновые газовые время-проекционные камеры
- FGDs – высокосегментированный пластиковый сцинтилляционный детектор
- SMRD – мюонный детектор, сцинтилляционные детекторы внутри ярма магнита

Рабочий объём TPC: исключаем стены и катод



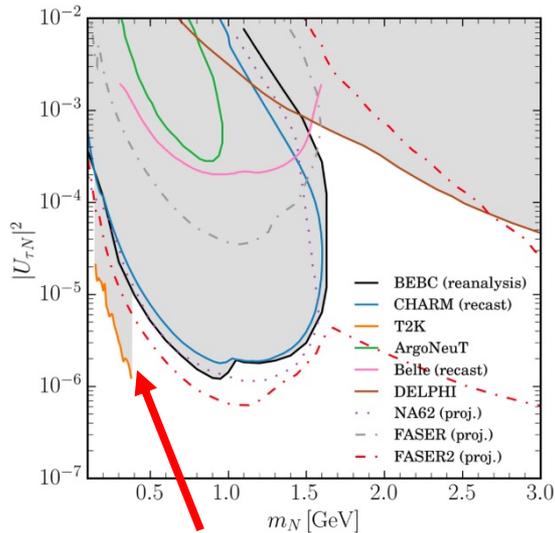
Текущие ограничения на элементы смешивания



Результаты T2K (2019)

Предсказания для малых масс [5]

Результаты T2K (2019)



Результаты T2K (2019)

Текущие ограничения и предсказания (90% CL) [4]
 Цветные области – ограничения, установленные коллаборациями

- Ограничения T2K лучшие при массах $\approx M_K$
- Лучшее ограничение на $|U_\tau|^2$

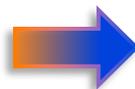
Поиск тяж. нейтрино в 2019 [6]:

- $K^\pm \rightarrow l_\alpha^\pm N$ ($\alpha = e, \mu$)
- K^+ в ν -моде и K^- в $\bar{\nu}$ -моде

Анализ 2019, протоны на мишень:

12.34×10^{20} ν -мода

6.29×10^{20} $\bar{\nu}$ -мода



Новый поиск тяж. нейтрино:

- $M^\pm \rightarrow l_\alpha^\pm N$ ($M = K, \pi; \alpha = e, \mu$)
- M^\pm ($M = K, \pi$) в ν - и $\bar{\nu}$ -модах
- Добавлены распады **пионов** $\pi^\pm \rightarrow l_\alpha^\pm N$
- **Обновлённый** трекинг, сигнал и фон
- Доступна **новая статистика**

Новый анализ, протоны на мишень:

12.34×10^{20} ν -мода

8.61×10^{20} $\bar{\nu}$ -мода

- **События в газе TPC**, чтобы уменьшить фон от взаимодействий ν
- Изучение распадов: $M^\pm \rightarrow l_\alpha^\pm N$ ($M = K, \pi; \alpha = e, \mu$)
 $N \rightarrow \mu^\pm \pi^\mp, N \rightarrow e^\pm \pi^\mp, N \rightarrow e^+ e^- \nu, N \rightarrow \mu^+ \mu^- \nu, N \rightarrow e^\pm \mu^\mp \nu$
- Сигнальная топология: 2 близких противоположно заряженных трека, начинающихся в одном рабочем объёме TPC
- Применение вето, идентификации частиц и кинематических критериев отбора

Источники неопределённостей: детекторная систематика для эффективности селекции + систематика пучка

Детекторная систематика (*предварительно*):

Относительная ошибка на число отобранных сигнальных событий

▪ Искажения магнитного поля	0.27%
▪ Разрешение импульса	0.45%
▪ Масштаб импульса	0.06%
▪ TPC PID	0.92%
▪ Восстановление заряда	0.11%
▪ Эффективность кластеров	0.0005%
▪ Эффективность треков	0.38%
▪ Эффективность мэтчинга TPC-FGD	0.04%
▪ Вторичные взаимодействия π	2.21%
▪ Разрешение позиции вершины	0.14%
▪ Распад родительского мезона	0.03%

$$N \rightarrow e^- \pi^+$$
$$m_N = 250 \text{ МэВ}$$

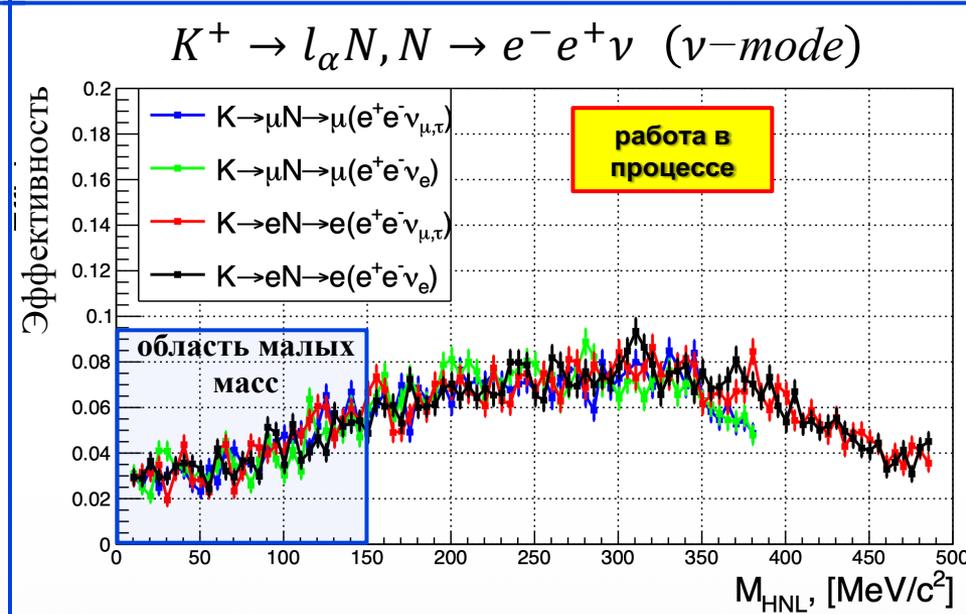
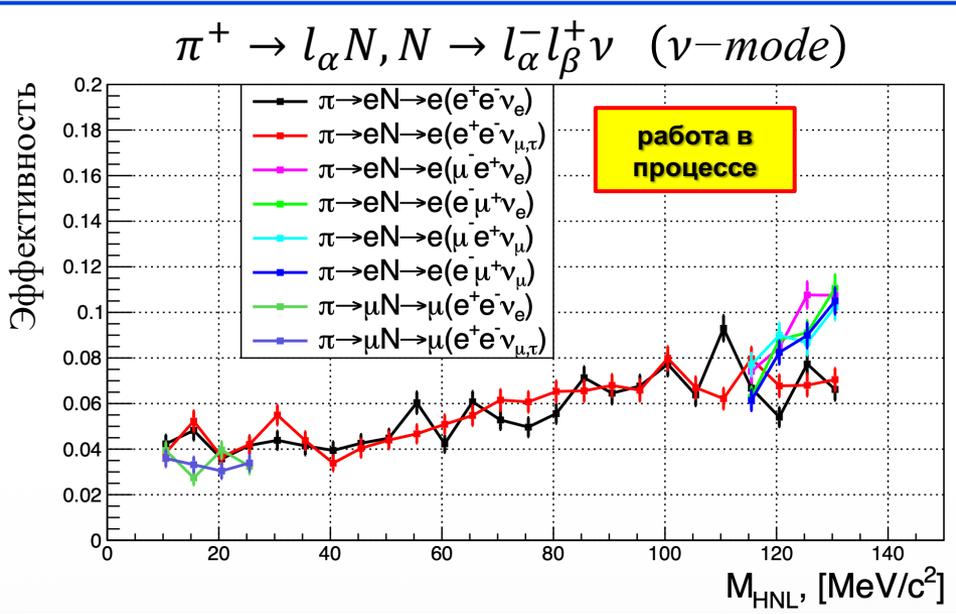
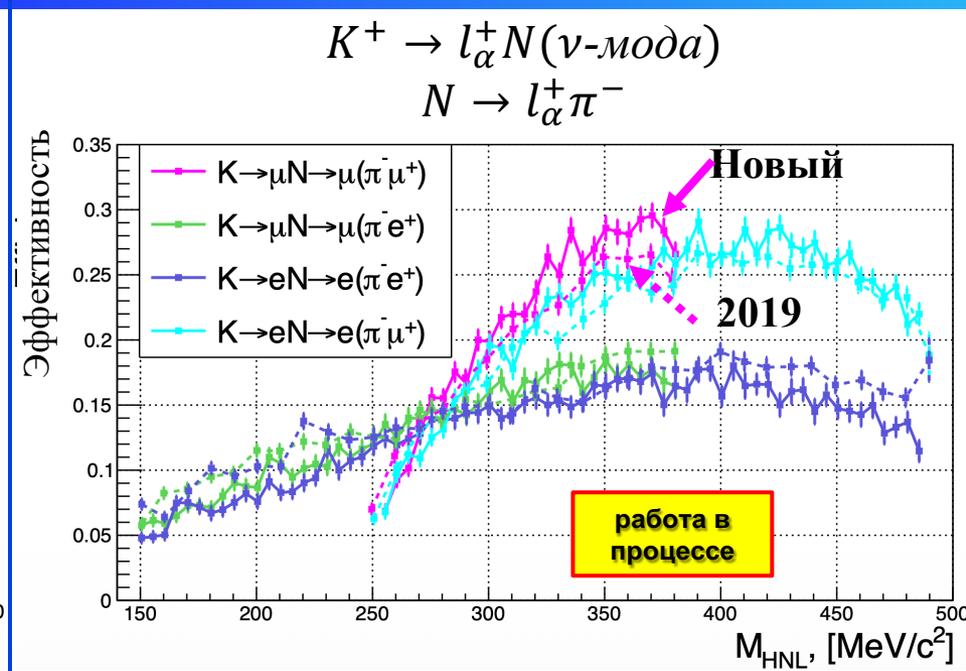
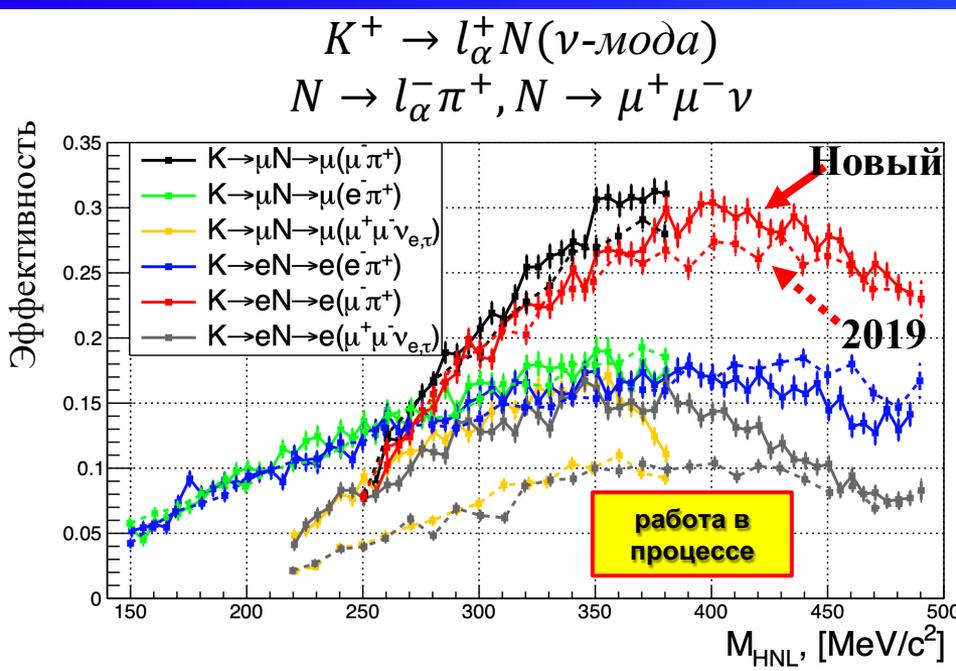
▪ Итог	2.49%
--------	-------

Систематика пучка (*предварительно*):

Относительная ошибка на число тяж. нейтрино в Монте-Карло моделировании

20% для K^\pm и 10% для π^\pm [7]

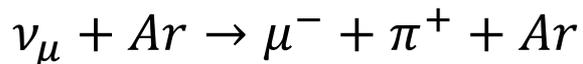
Эффективность: новый анализ (сплошные линии) и 2019 [6] (пунктир)



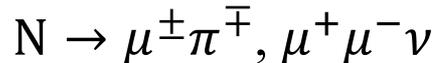
Фон Монте-Карло, нормировка на данные

Канал селекции	Фон (ν -мода)	Фон ($\bar{\nu}$ -мода)
$\mu^\pm \pi^\mp$	1.05 ± 0.4	0.36 ± 0.21
$e^- \pi^+$	0.05 ± 0.05	0 ± 0
$e^+ \pi^-$	0.12 ± 0.13	0 ± 0
$\mu^+ \mu^-$	0.93 ± 0.35	0.36 ± 0.21
$e^+ e^-$	0.12 ± 0.12	0 ± 0

Когерентное рождение пионов от взаимодействий ν на ядрах Ar в ТРС:



вносит доминирующий вклад в моды



• **Другие взаимодействия ν в газе:**

- резонансное рождение π ;
- квазиупругое рассеяние;

• $\gamma \rightarrow e^+ e^-$ и события вне рабочего объёма для каналов $N \rightarrow e^\pm \pi^\mp$

Использующиеся в анализе набранные данные в Т2К:

Суммарный POT:
 12.34×10^{20} ν -мода
 8.61×10^{20} $\bar{\nu}$ -мода

Ограничения с использованием контрольных образцов:

1. Инвертирование полярного угла
2. События в стенках ТРС

оценка взаимодействий ν с помощью Монте-Карло генератора NEUT [8]

Чувствительность: одноканальный подход

“Одноканальный”:

Каждая мода рождения, распада независимо

“Комбинированный”:

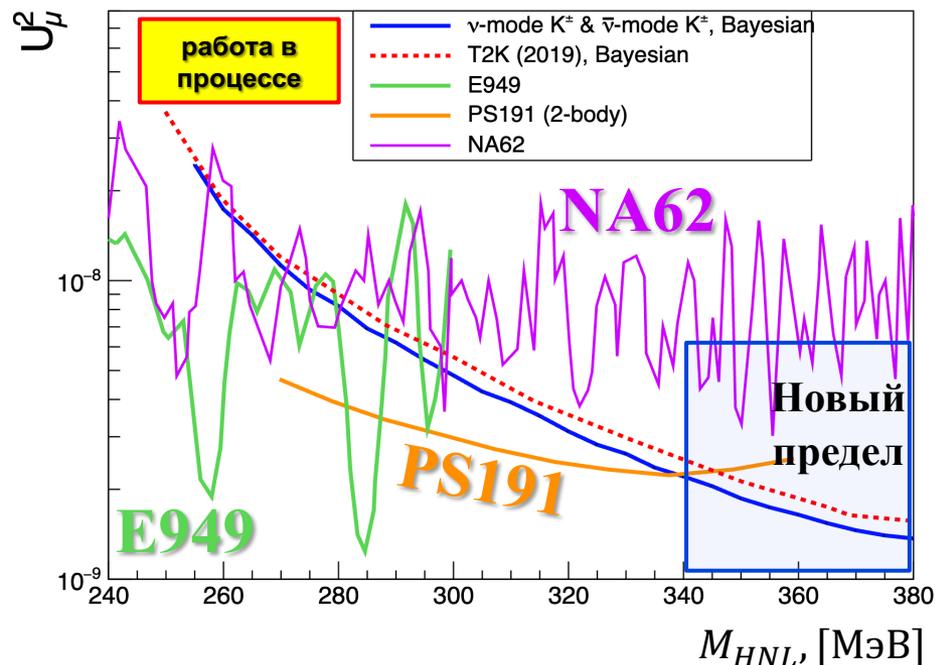
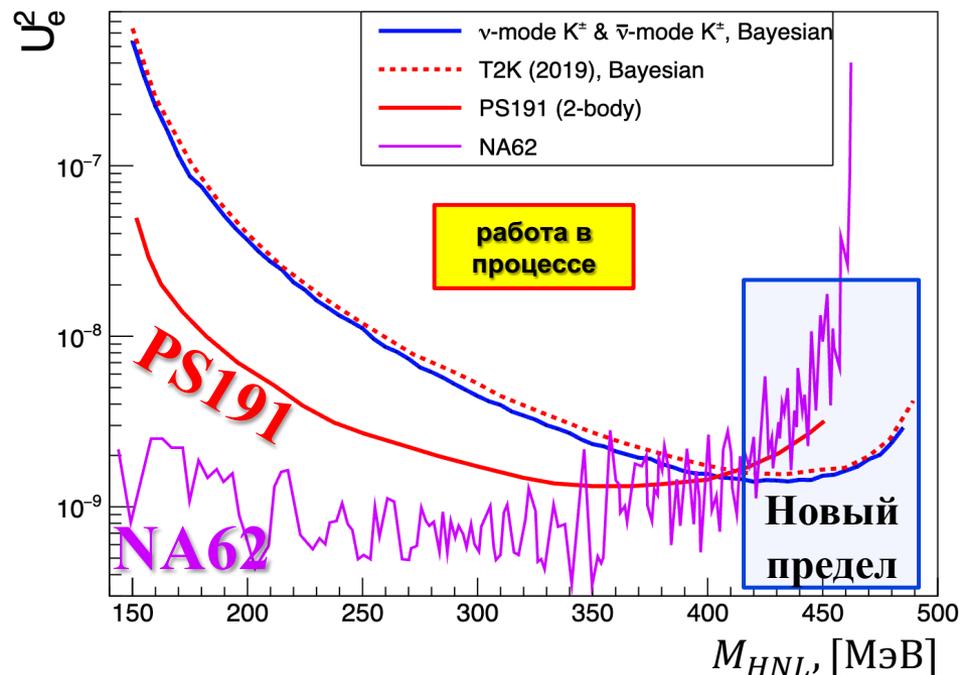
Все моды рождения, распада одновременно

- Ограничения на U_α ($\alpha = e, \mu, \tau$) без предположений об иерархии U_α

$$|U_i|^2_{\text{предел}} = \sqrt{\frac{U_n}{N_{\text{событий}}}}$$

$N_{\text{событий}}$: ожидаемый сигнал при $|U|^2 = 1$

U_n : 90% С.Л. Пуассоновский предел для n наблюдаемых событий



Вклад моды i в канал селекции A характеризуется:

- Ожидаемым числом распадов Φ_i предполагая $U_e^2 = U_\mu^2 = U_\tau^2 = 1$
- Эффективностью селекции в текущем канале, $\varepsilon_{A,i}$
- Значениями $U_{e,\mu,\tau}^2$ через фактор $f_i = U_\alpha^2 \sum U_{\beta_j}^2$
 $\alpha, \beta_j \in \{e, \mu, \tau\}$, α – аромат при рождении HNL, β_j – аромат при распаде HNL

Ожидаемое число событий N_A в канале селекции A (с фоном B_A):

$$N_A = B_A + \sum_i \varepsilon_{A,i} \times f_i(U_e^2, U_\mu^2, U_\tau^2) \times \Phi_i$$

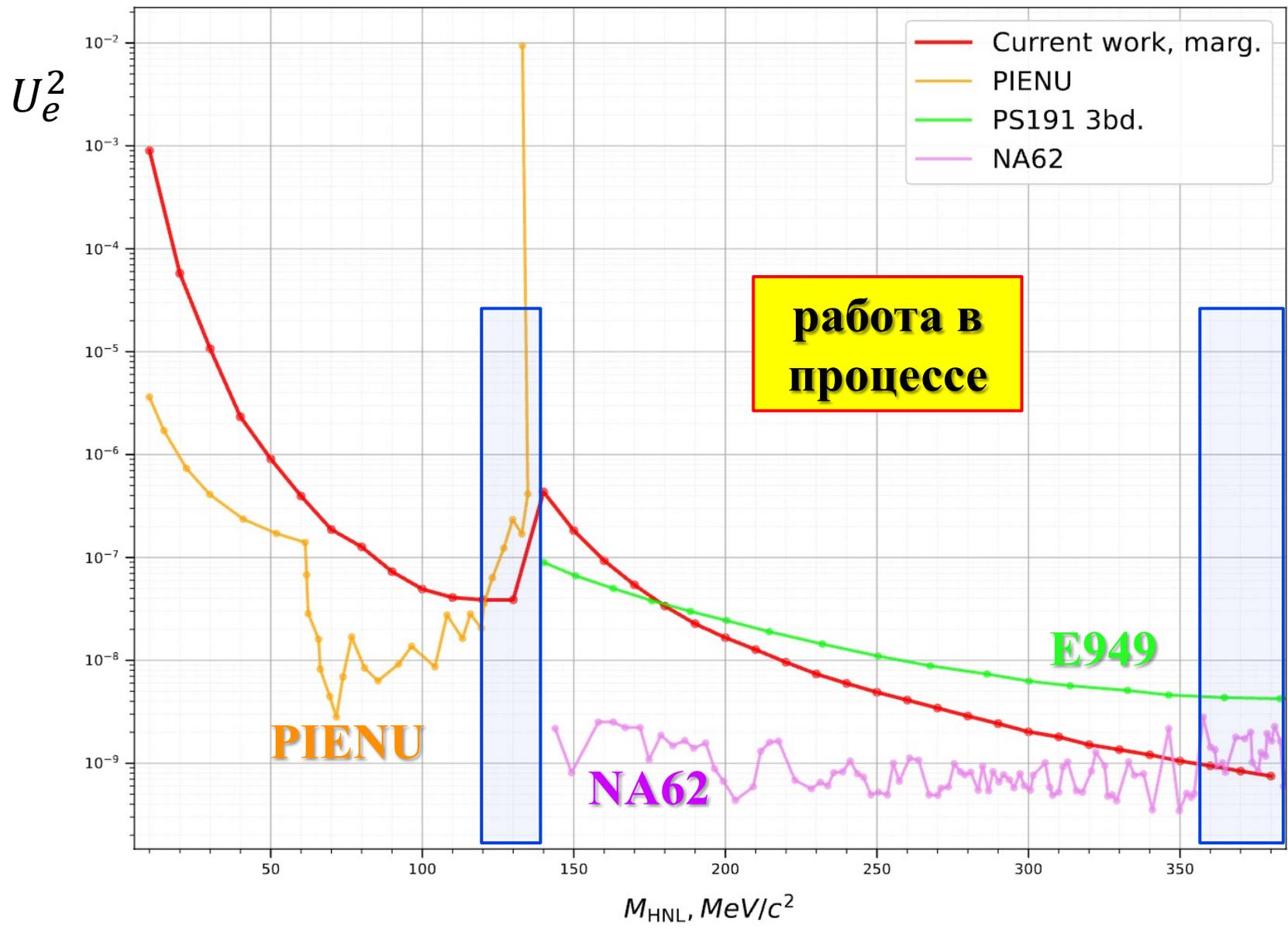
Байесов подход. Вероятность для наблюдаемого числа событий n_A^{obs}

$$L = \prod_A \text{Poisson}(n_A^{obs}, N_A)$$

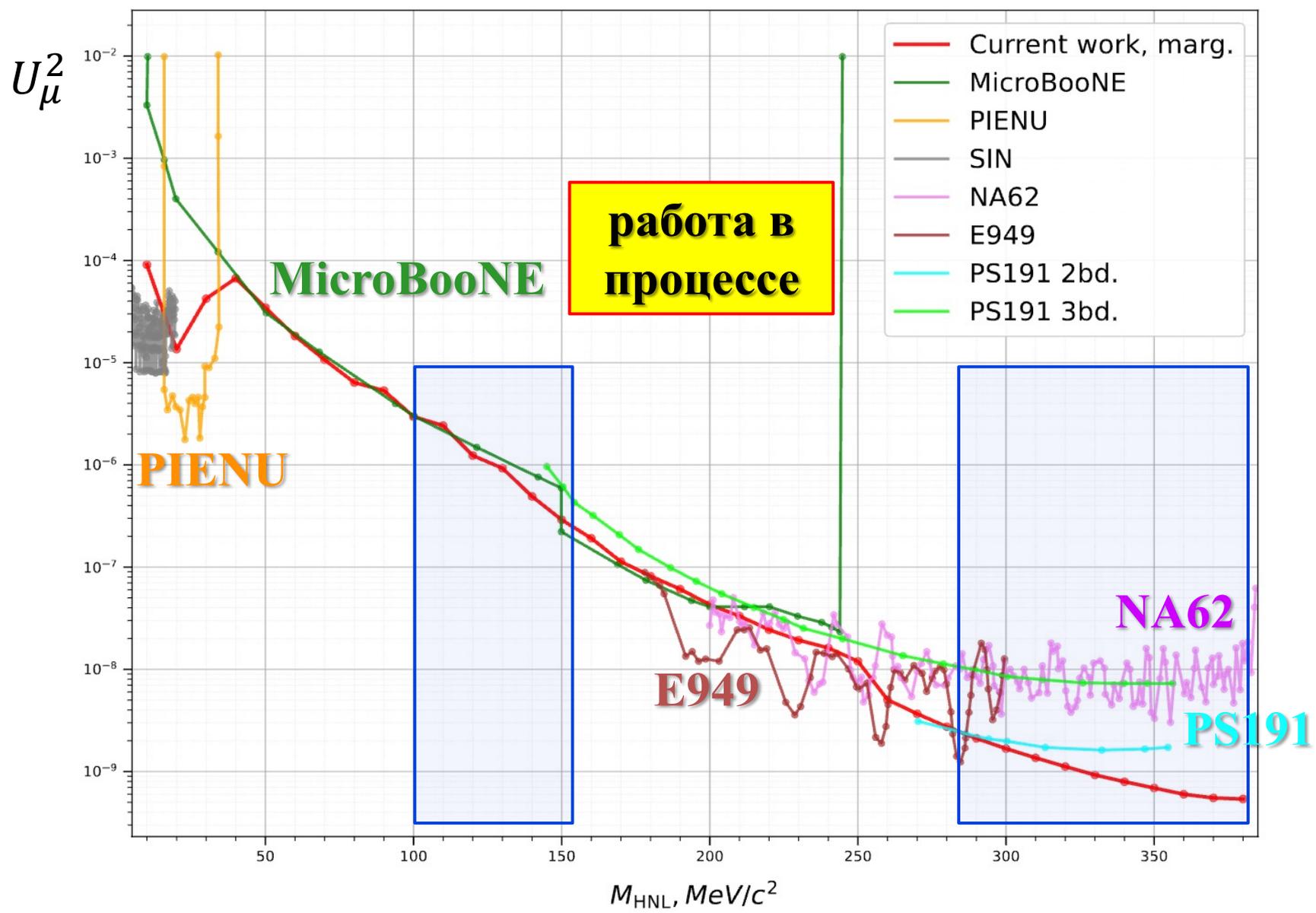
Метод Монте-Карло с марковскими цепями используется для интегрирования

90% интервалы определяются через **профайлинг/маргинализацию** по остальным элементам смешивания

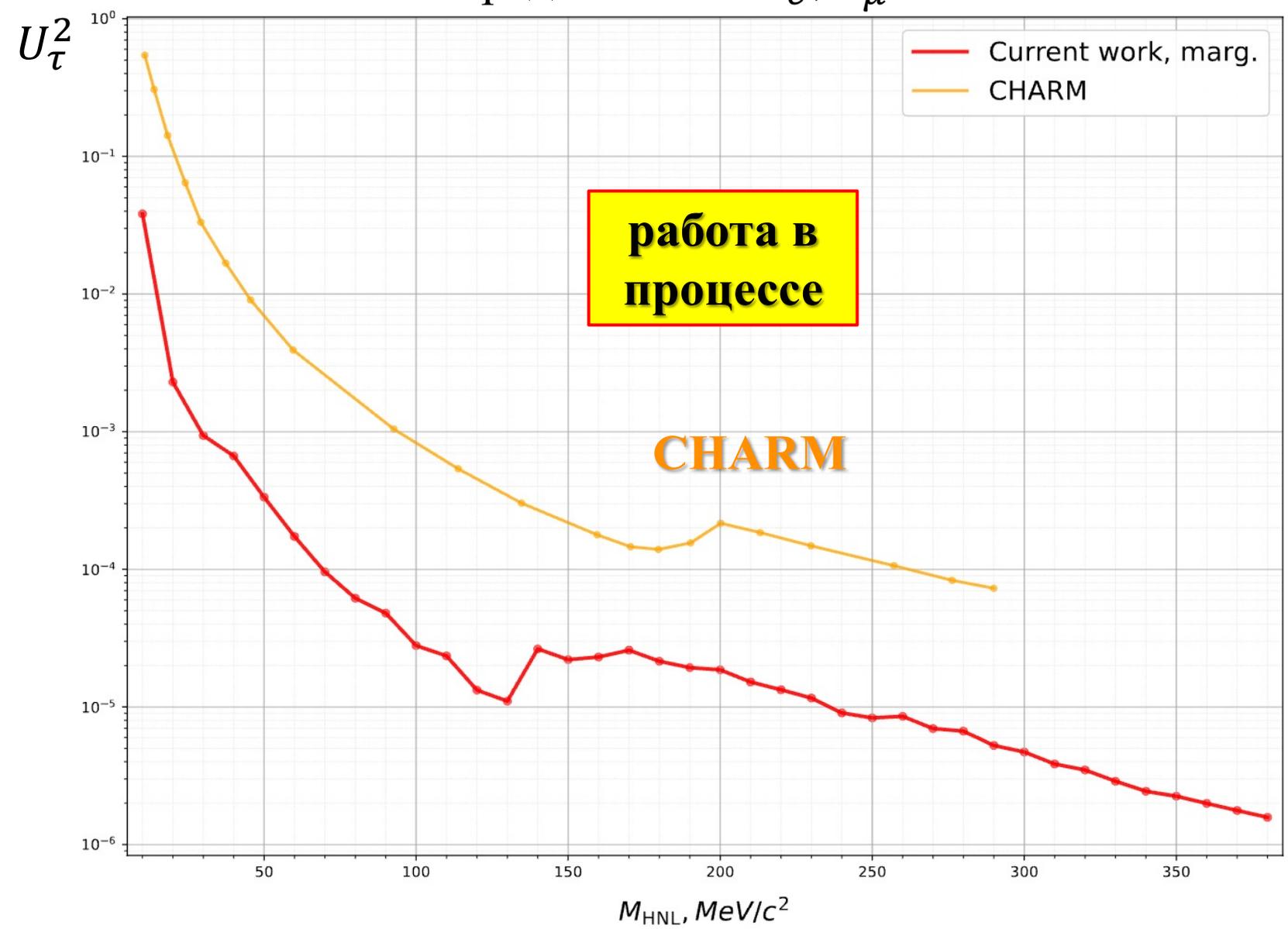
Чувствительность: комбинированный подход



Чувствительность: комбинированный подход



Усреднение по U_e^2, U_μ^2



Заклучение

- В 2019 г. T2K установил актуальные на данный момент ограничения на U_α ($\alpha = e, \mu, \tau$) в области масс

$$140 < m_N < 493 \text{ МэВ}/c^2$$

- Новый анализ основан на *обновлённом трекинге* и *расширен* в область $m_N < 140$ МэВ
- Ожидаемый фон ≤ 1 события в каждом канале селекции для 2.63×10^{21} POT
- Сейчас T2K интенсивно набирает статистику, что позволит улучшить ограничения на U_α
- Планируется получить новые ограничения на U_α :

Одноканальный подход:

- U_e^2 в области масс $415 < m_N < 493 \text{ МэВ}/c^2$

Комбинированный подход:

- U_e^2 в области $120 < m_N < 130 \text{ МэВ}/c^2$

- U_μ^2 в области $100 < m_N < 150 \text{ МэВ}/c^2$ и $290 < m_N < 380 \text{ МэВ}/c^2$

- U_τ^2 в области $m_N < 140 \text{ МэВ}/c^2$

Авторы выражают благодарность Ю.Г. Куденко и членам коллаборации T2K.

***СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!***

BACKUP

Sensitivity study

“Single-channel”: **COMPLETED**
 each HNL prod. & decay mode *independently*

“Combined”: **IN PROGRESS**
 all HNL prod. & decay modes *simultaneously*

- Limits on U_α ($\alpha = e, \mu, \tau$) without assumptions about U_α hierarchy

$$|U_i|^2_{limit} = \sqrt{\frac{U_n}{N_{events}}}$$

N_{events} : expected signal assuming $|U|^2 = 1$
 U_n : 90% C. L. Poisson limit for n observed events

Highland-Cousins method [9]

Feldman-Cousins method [10]

Bayesian method [11]

$b = 0$

$b \neq 0$

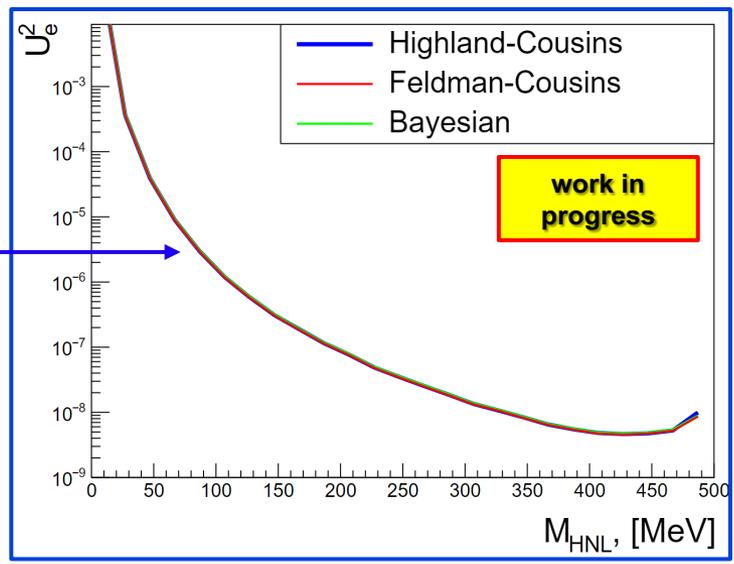
$b \neq 0$

Signal systematics

Signal, background systematics

Signal efficiency, bkg. uncertainties using prior probabilities π

Cross-check between methods

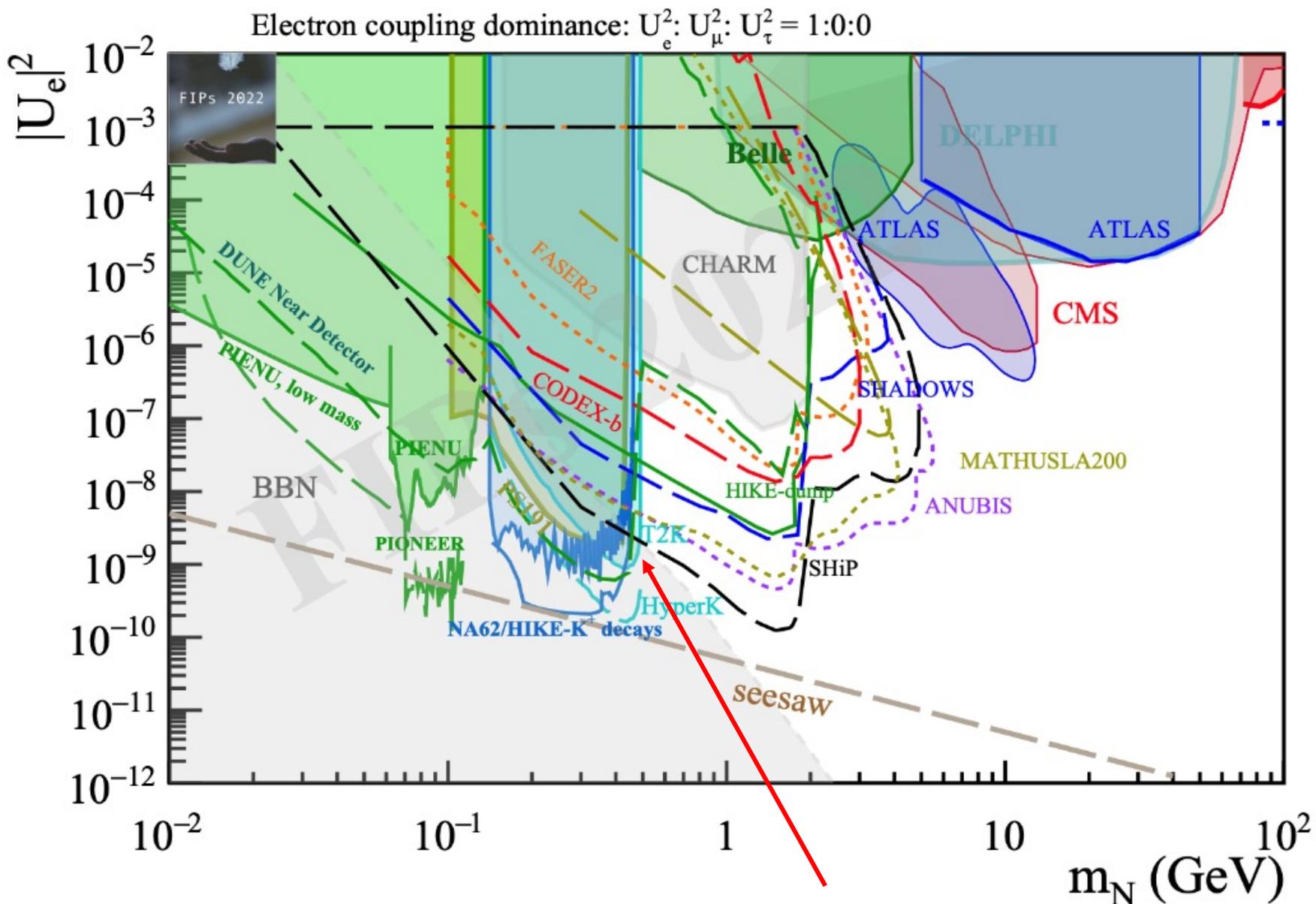


$K \rightarrow eN \rightarrow e(e\nu_e)$

90% C.L. data POT normalization

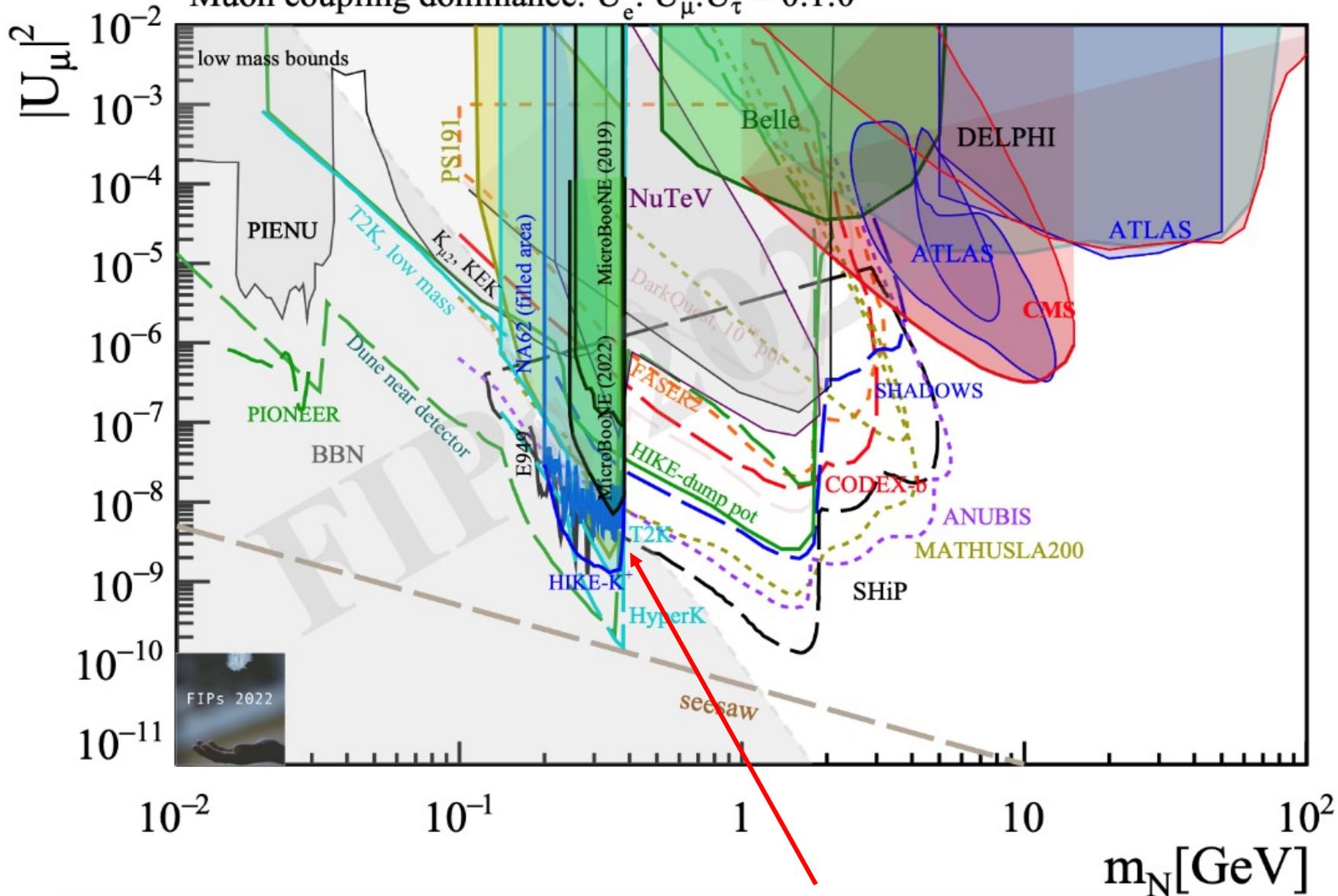
9. Nucl. Instrum. Meth. A320, 331 (1992)
 10. Phys. Rev. D57, 3873 (1998)
 11. CDF-MEMO-STATISTICS-PUBLIC-5928 (2005).1380

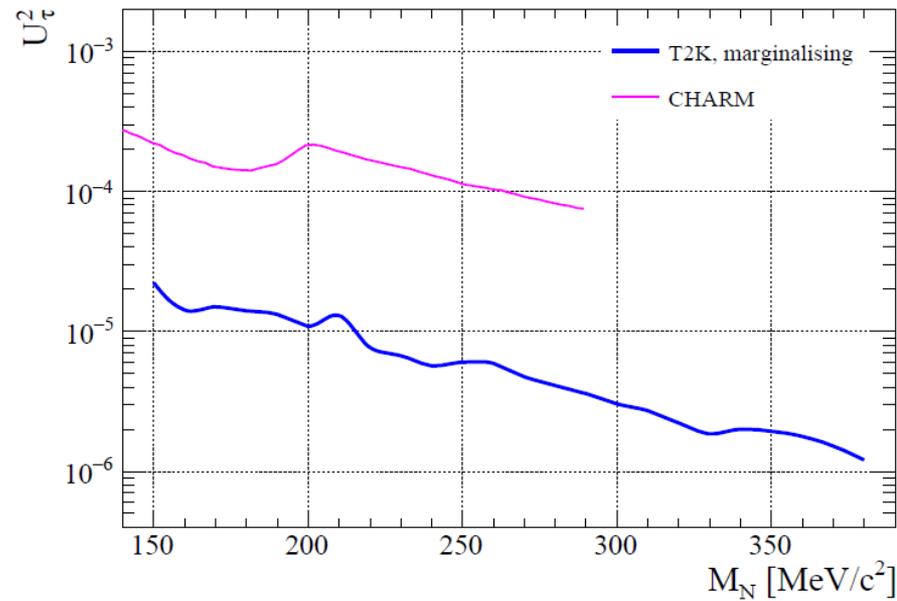
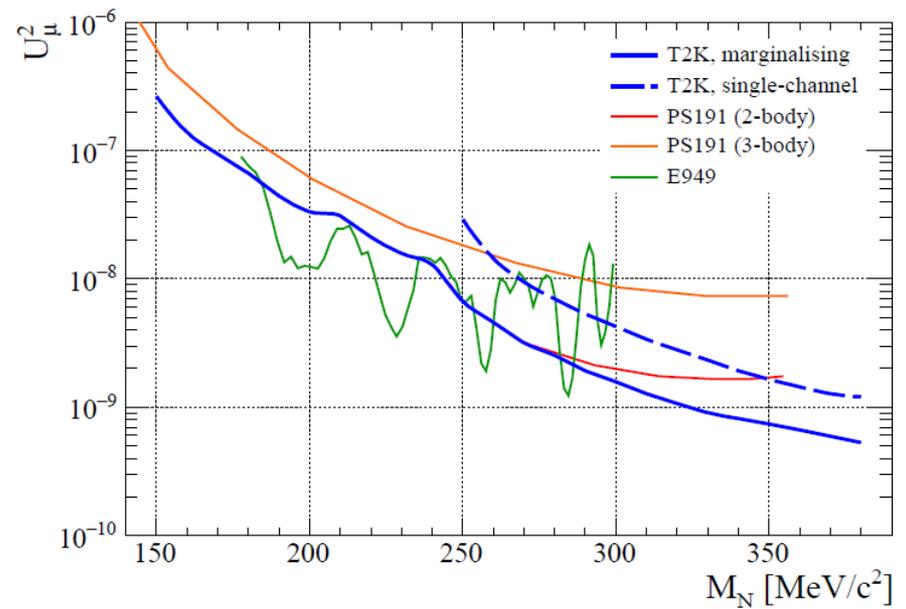
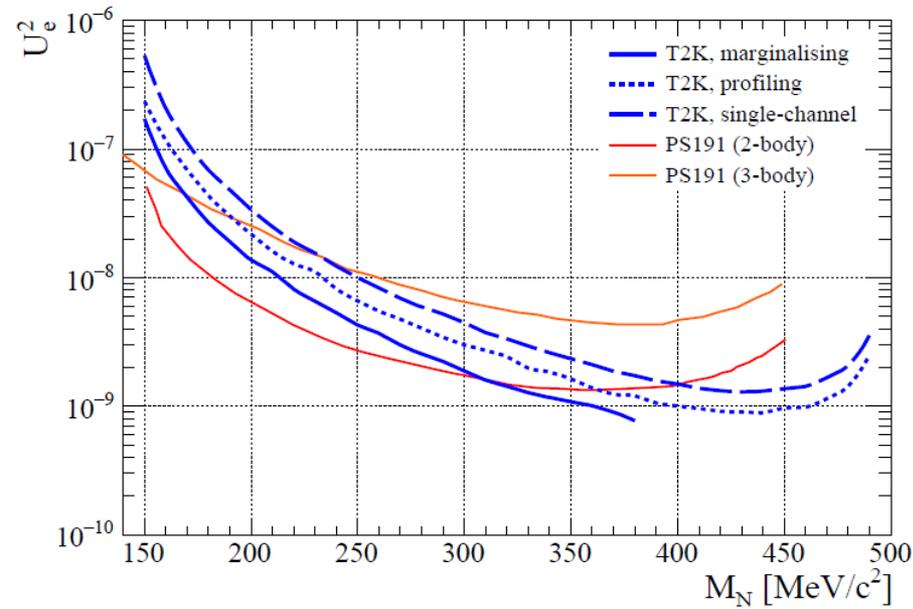
Current Limits



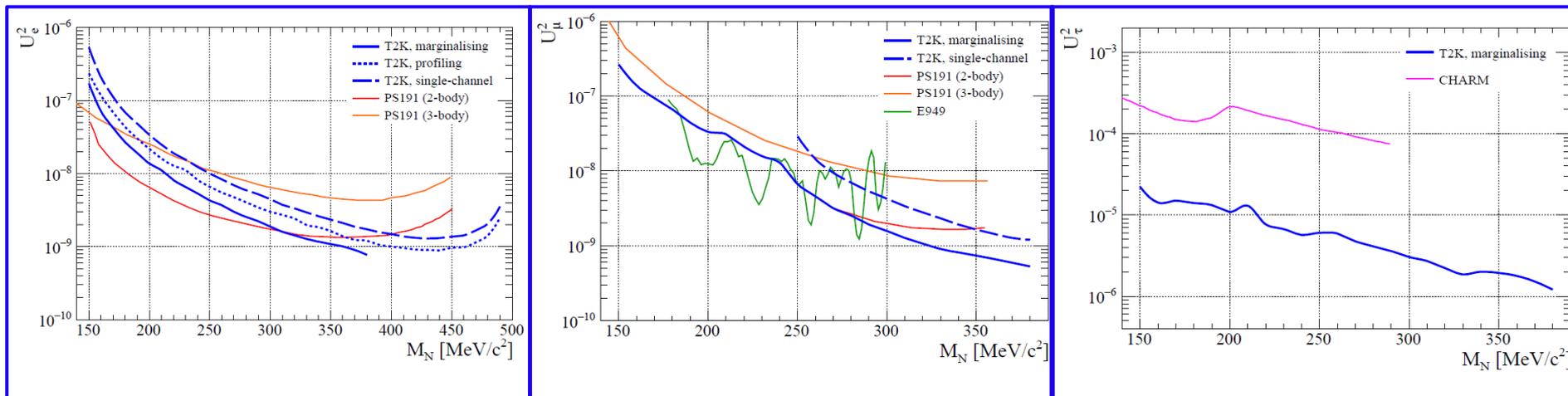
Current Limits

Muon coupling dominance: $U_e^2 : U_\mu^2 : U_\tau^2 = 0 : 1 : 0$





2019 results



90% upper limits on mixing elements as a function of HNL mass.
“Combined” and “single-channel” approaches.

Blue dashed lines – single-channel approach

(one single HNL production and decay mode considered at a time)

Blue solid lines – after marginalization over other mixing elements.

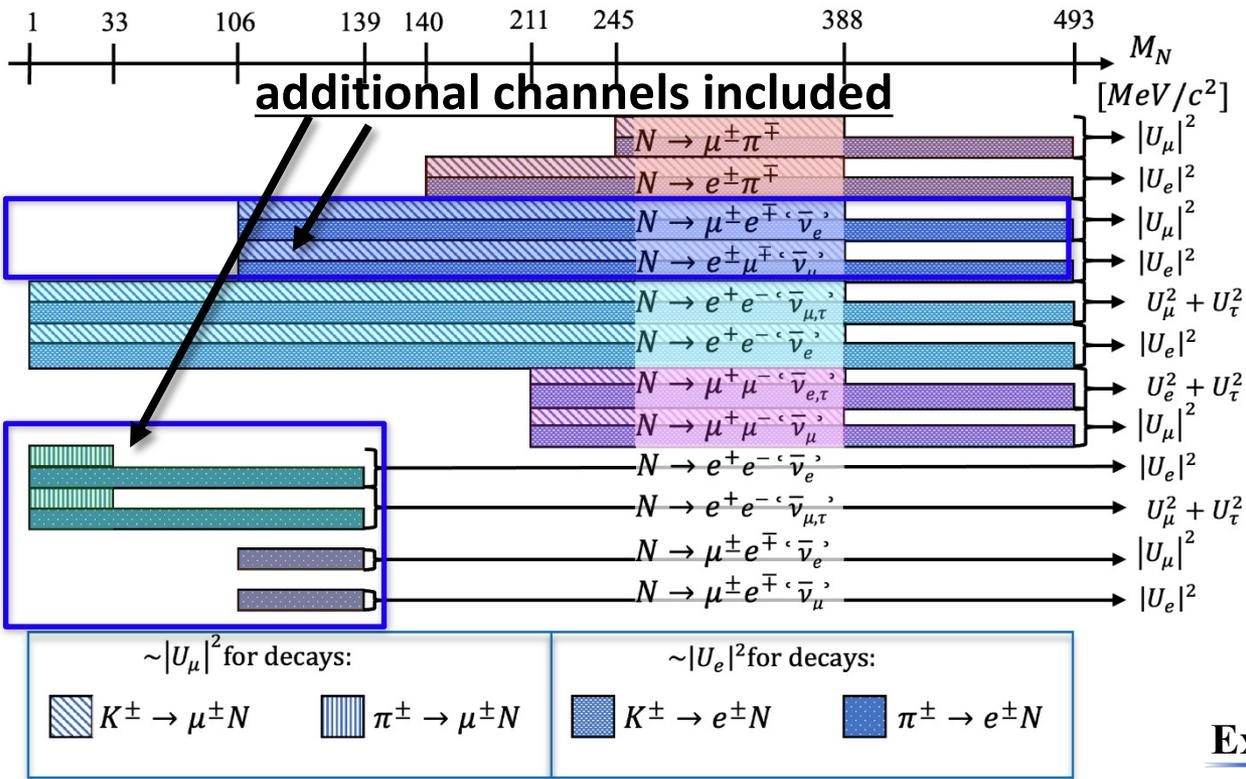
Top left plot: blue dotted line – profiling used ($U_{\mu\mu}^2 = U_{\tau\tau}^2 = 0$).

Limits compared to PS191, E949, CHARM. Figures taken from [*].

Heavy neutrino decays

HNLs decay through charged or neutral current.

Considered decay modes:



Schematic of production and decay modes included in analysis for HNL with $M_N < 493 \text{ MeV}/c^2$. Bars show allowed kinematic regions for each decay mode with the corresponding mixing element(s).

- Assuming $M_2 \sim M_3 \equiv M_N$, hence experiment sensitive to $|U_\alpha|^2 = \sum_{I=\{2,3\}} |\Theta_{\alpha I}|^2$
- Look for heavy neutrino decay after their production, study kinematics of daughter particles. Sensitive to $U_\alpha^2 U_\beta^2$

Example:

meson decays $H^\pm \rightarrow l_\alpha^\pm N_I$, $BR \sim |\Theta_{\alpha I}|^2$
 HNL decays: $N_I \rightarrow l_\beta^\pm \pi^\mp$, $BR \sim |\Theta_{\beta I}|^2$

Experiment is sensitive to $U_\alpha^2 U_\beta^2$, where $|U_\alpha|^2 = \sum_{I=\{2,3\}} |\Theta_{\alpha I}|^2$

T2K low mass limits

Argüelles, C.A., Foppiani, N. and Hostert, M.,
2022. *Physical Review D*, 105(9), p.095006.

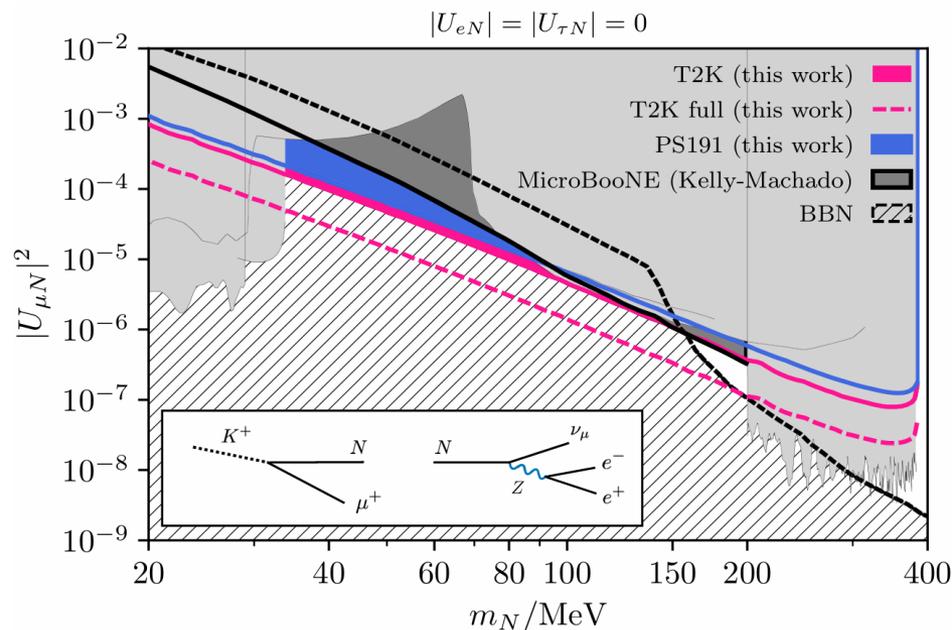


FIG. 2. Constraints on the mixing of HNLs with the muon flavor as a function of its mass for a minimal HNL model at 90% C.L. , considering only the production and decay mode: $K \rightarrow \nu_\mu N \rightarrow \nu_\mu(e^+e^-\bar{\nu}_\mu)$. For MicroBooNE, T2K, and PS191 the regions above the lines are excluded, while BBN excludes the region below the line. In gray we show other model-independent constraints. T2K full refers to the projected sensitivity of T2K with the final dataset, which will be collected by the end of the experiment.

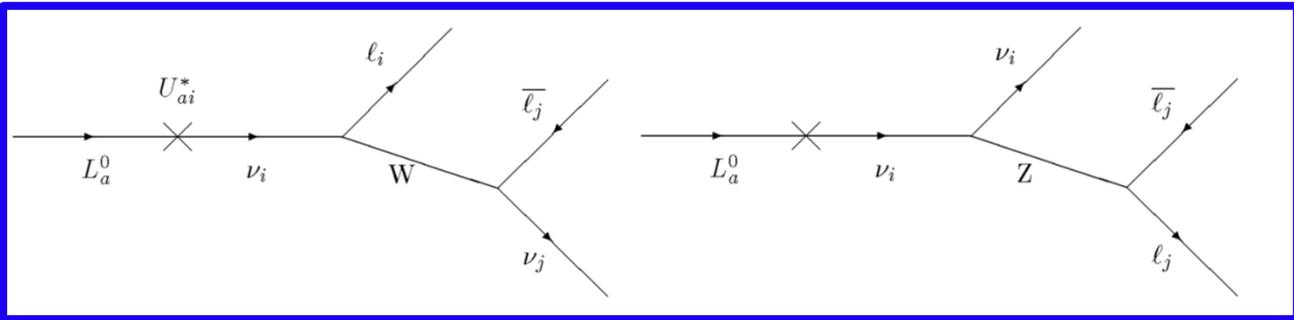
of the e^+e^- final state. The analysis observes no event in all channels, and provides some of the strongest limits in the mass region $140 \leq m_N \leq 493$ MeV. We use their null results and extrapolate the experimental efficiencies to estimate the constraint on light HNLs with $20 \leq m_N \leq 140$ MeV. We neglect systematic uncertainties and backgrounds, as they provide negligible contributions to the limits. We reproduce the official T2K result above the pion mass with reasonable accuracy.

Simulation strategy

- Start from standard ν flux, apply event-by-event weighting, kinematics modification:
 1. $m_\nu \neq m_N$, hence change kinematics of parent meson decay
 2. $\text{BR}(K \rightarrow l_\alpha \nu_\alpha)$ changed to $\text{BR}(K \rightarrow l_\alpha N)$ assuming $U_\alpha = 1$
- *Events in TPC gas fiducial volume* to reduce background from ν interactions
- HNL decays simulated randomly along trajectories in TPCs

Constraints on $|U_\tau|$

$N \rightarrow \mu^+ \mu^- \nu_\mu$ (NC, CC) and $N \rightarrow \mu^+ \mu^- \nu_{e,\tau}$ (NC) modes:



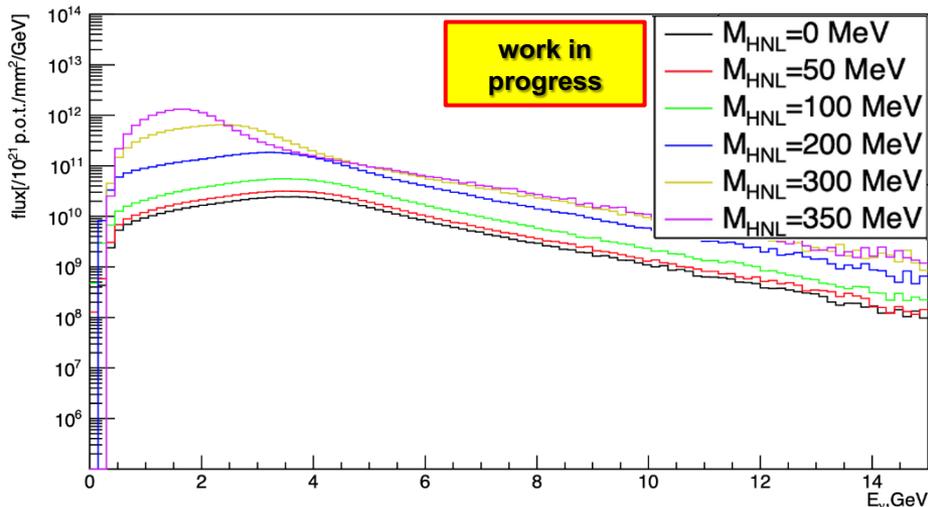
Feynman diagrams for HNL decay $N \rightarrow \mu\mu\nu$ via CC (left) and NC (right)

With NC any type of active neutrino can be produced (ν_e, ν_μ, ν_τ) \rightarrow sensitive to $|U_\tau|$,

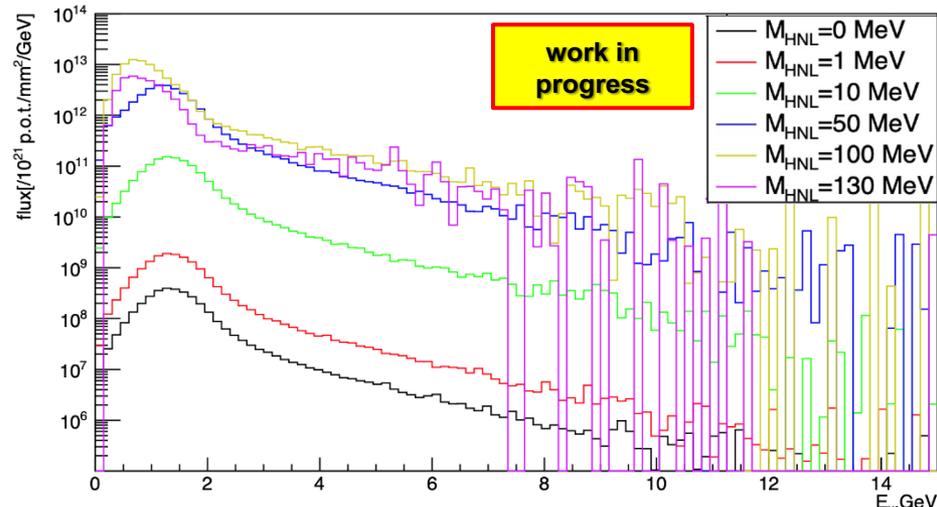
e.g. $K \rightarrow eN, N \rightarrow \mu^+ \mu^- \nu_{e,\tau}$ sensitive to $(U_e)^2 (U_e^2 + U_\tau^2)$

Heavy neutrino flux

Flux from reaction $K^+ \rightarrow \mu^+ N$, FHC



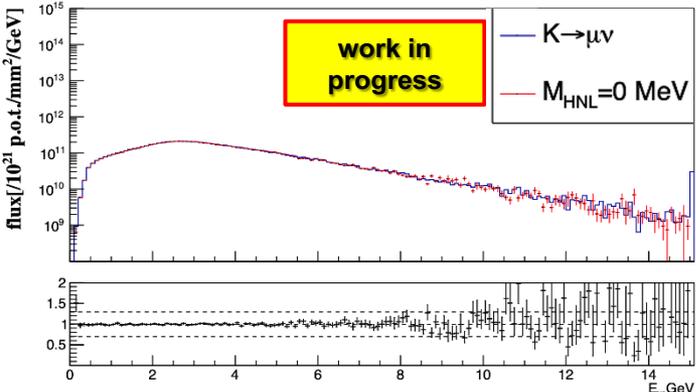
Flux from reaction $\pi^+ \rightarrow e^+ N$, FHC



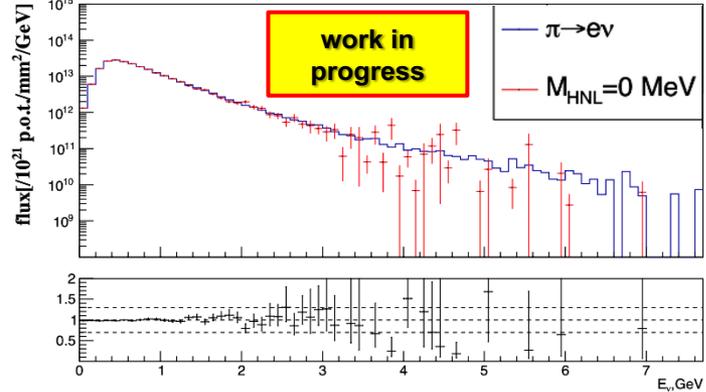
HNL flux at ND280 front plane for $K^+ \rightarrow \mu^+ N$ and $\pi^+ \rightarrow e^+ N$ modes for different HNL masses assuming $|U_e| = |U_\mu| = 1$

Cross check of weighting machinery

Flux from reaction $K^+ \rightarrow \mu^+ N$, FHC



Flux from reaction $\pi^+ \rightarrow e^+ N$, FHC



Comparison of HNL spectra for $M_{HNL} = 0$ MeV with active neutrino spectrum from $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ and $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ decays (assuming $|U_e| = |U_\mu| = 1$)

Expected sensitivity

U_α limits can be set with two approaches:

1. “Single-channel”: each HNL production & decay mode independently

For example, $\mu^\pm\pi^\mp$ channel can constrain:

- U_μ^2 considering only $K^\pm \rightarrow \mu^\pm N, N \rightarrow \mu^\pm\pi^\mp$
- or $U_e \times U_\mu$ considering only $K^\pm \rightarrow e^\pm N, N \rightarrow \mu^\pm\pi^\mp$

2. “Combined”: all HNL production & decay modes simultaneously
 - limits on U_α ($\alpha = e, \mu, \tau$) without assumptions about U_α hierarchy

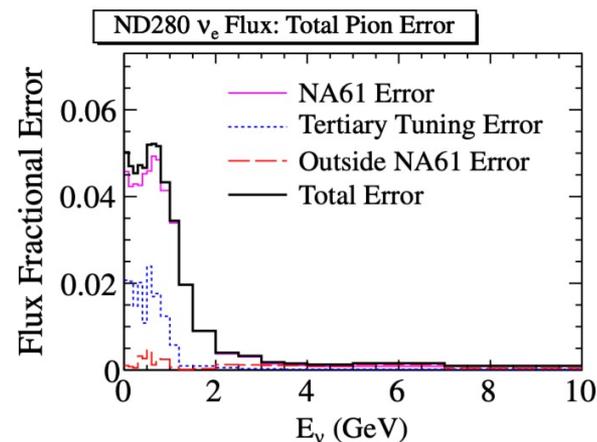
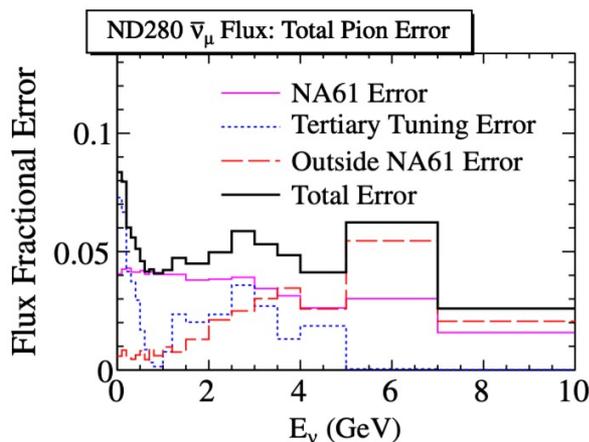
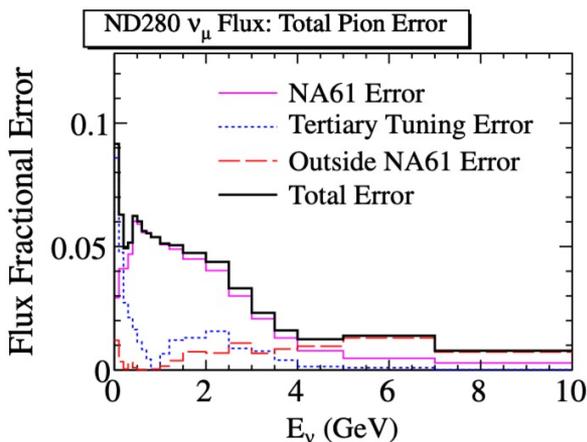
Example:

- Using $N \rightarrow \mu\mu\nu$ mode, we can put a limit on $U_e\sqrt{U_e^2 + U_\tau^2}$ with assumption $U_\mu \ll U_e$, where contribution comes only from $K \rightarrow eN, N \rightarrow \mu^+\mu^-\nu_{e,\tau}$
- With “combined” approach we can put limits on each individual U_α ($\alpha = e, \mu, \tau$) without assumptions about U_α hierarchy

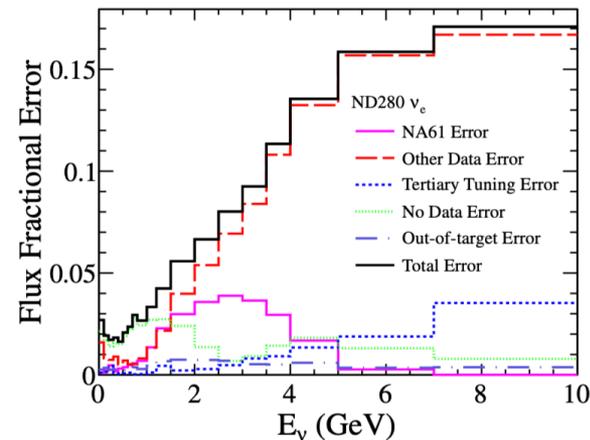
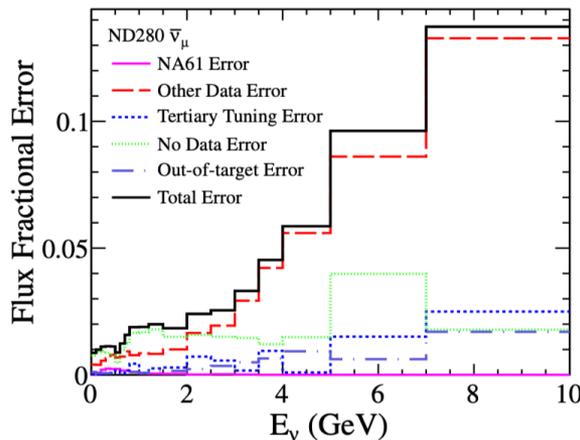
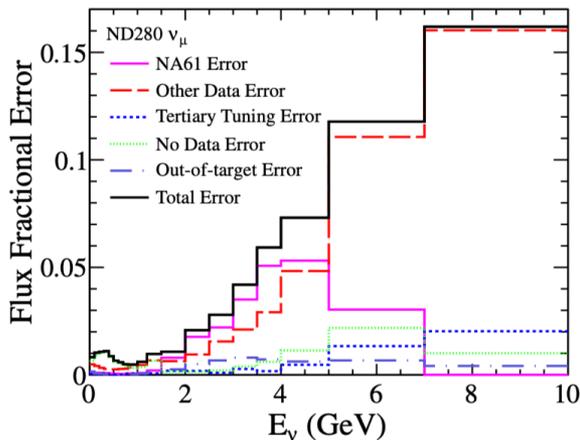
Flux systematics:

20% for K^\pm and 10% for π^\pm

preliminary estimation!



Fractional flux error due to **pion** production as a function of neutrino energy, for each flavor



Fractional flux error due to **kaon** production as a function of neutrino energy, for each flavor

Selection criteria

- Required 2 close opposite charge tracks in TPC with extrapolated vertex in TPC Fiducial Volume
- Veto cuts: no activity in detector upstream to TPC where decay occurred (e.g. FGD1 for TPC2)
- No additional good quality tracks in the TPC
- Analysis branches: $\mu^\pm\pi^\mp$, $e^-\pi^+$, $e^+\pi^-$, $\mu^+\mu^-$, e^+e^-
- PID cuts: use TPC dE/dx to build corresponding PID likelihoods (e.g. \mathcal{L}_μ , \mathcal{L}_π , \mathcal{L}_e)
- Kinematic cuts:
 - total HNL momentum
 - angle between HNL daughter tracks
 - invariant mass
 - polar angle (between HNL direction and Z-axis)
 - 4-momentum transfer $|t| \equiv (P_\nu - P_\mu - P_\pi)^2$

$$|U_i|_{limit}^2 = \sqrt{\frac{U_n}{N_{events}}}$$

- Feldman-Cousins:

U_n – 90% C. L. Poisson limit for n observed events

N_{events} – expected number of signal events assuming $|U|^2 = 1$

- Highland-Cousins:

$$U_n = U_{n0} \left\{ 1 + \frac{E_n \sigma_{Acc}^2}{2} \left(1 + \left(\frac{E_n \sigma_{Acc}}{2} \right)^2 \right) \right\}$$

U_{n0} – 90% C. L. Poisson limit for n observed events;

σ_{Acc} – detector acceptance error

$$E_n = U_{n0} - n$$

- Bayesian

$$p(s|n) \propto \int_0^\infty db \int_0^\infty d\eta \mathcal{L}(s, \eta, b|n) \pi_S(\eta) \pi_B(b)$$

$$\mathcal{L}(s, \eta, b|n) = \frac{(s\eta + b)^n}{n!} e^{-s\eta - b}$$

$$\int_{s_{low}}^{s_{sup}} p(s|n) ds = 1 - \alpha$$

$$p(U_e^2, U_\mu^2, U_\tau^2) = \int d\Phi d\varepsilon dB \times \mathcal{L} \times \pi_\Phi \pi_\varepsilon \pi_B \pi_{U^2}$$

$$p_{\text{prof}}(U_e^2) = p(U_e^2, U_{\mu, \text{max}}^2, U_{\tau, \text{max}}^2),$$

$$p_{\text{marg}}(U_e^2) = \int p(U_e^2, U_\mu^2, U_\tau^2) dU_\mu^2 dU_\tau^2,$$