

Wielkie dziury i małe cząstki – – jak wkrótce będziemy badać oscylacje neutrin

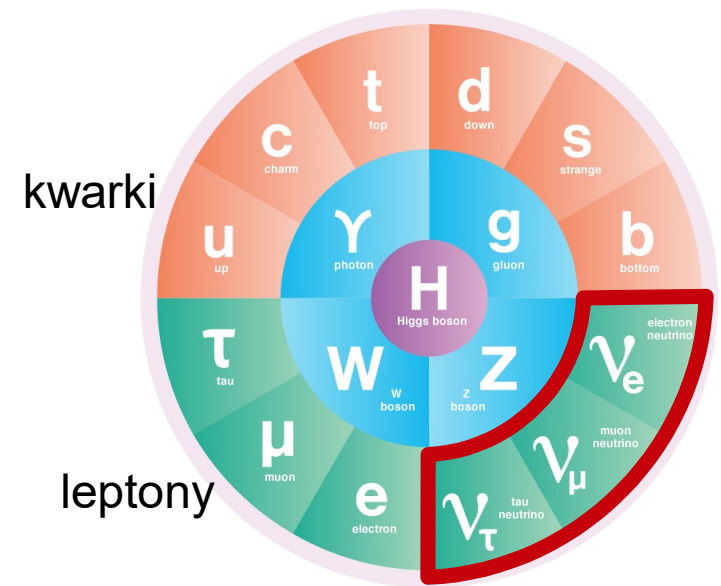


Justyna Łagoda



Małe cząstki: neutrino

- należą do rodziny leptonów
- występują w **trzech rodzajach** (zapachach)
- **nie mają ładunku** elektrycznego i kolorowego
- **bardzo słabo oddziałują** z materią
 - tzw. oddziaływania słabe, przenoszone przez bozony Z^0 , $W^\pm$
 - zapach można rozpoznać po powstającym leptonie naładowanym
- bardzo lekkie – kiedyś sądzono, że bezmasowe
- **OSCYLACJE** – cykliczna zmiana zapachu podczas lotu
 - wynikają z mieszania się stanów własnych zapachu i masy
 - z badań oscylacji można poznać parametry mieszania neutrin θ_{12} , θ_{23} , θ_{13} , δ_{CP} i różnice kwadratów mas Δm_{21}^2 , Δm_{32}^2
 - gdyby $\Delta m^2 = 0$, oscylacje by nie zachodziły



1998, @Takayan
June 1998

Atmospheric neutrino results
from Super-Kamiokande & Kamiokande

– Evidence for ν_μ oscillations –

T. Kajita
Kamioka observatory, Univ. of Tokyo
for the { Kamiokande
Super-Kamiokande } Collaborations



Nagroda Nobla 2015
T. Kajita, A. McDonald

Aktualna wiedza i aktualne pytania

$$\begin{aligned}\sin^2(\theta_{12}) &= 0.307 \pm 0.013 \\ \Delta m_{21}^2 &= (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \\ \sin^2(\theta_{23}) &= 0.553^{+0.016}_{-0.024} \quad (S = 1.1) \quad (\text{Inverted order}) \\ \sin^2(\theta_{23}) &= 0.558^{+0.015}_{-0.021} \quad (\text{Normal order}) \\ \Delta m_{32}^2 &= (-2.529 \pm 0.029) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad (\text{Inverted order}) \\ \Delta m_{32}^2 &= (2.455 \pm 0.028) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad (\text{Normal order}) \\ \sin^2(\theta_{13}) &= (2.19 \pm 0.07) \times 10^{-2} \quad (S = 1.2) \\ \delta, \text{ CP violating phase} &= 1.19 \pm 0.22 \pi \text{ rad} \quad (S = 1.2)\end{aligned}$$

Phys. Rev. D 110, 030001 (2024)

- duży postęp w ciągu ponad 25 lat, ale wciąż nie wiadomo:

- czy neutrino oscylują inaczej niż antyneutrino?

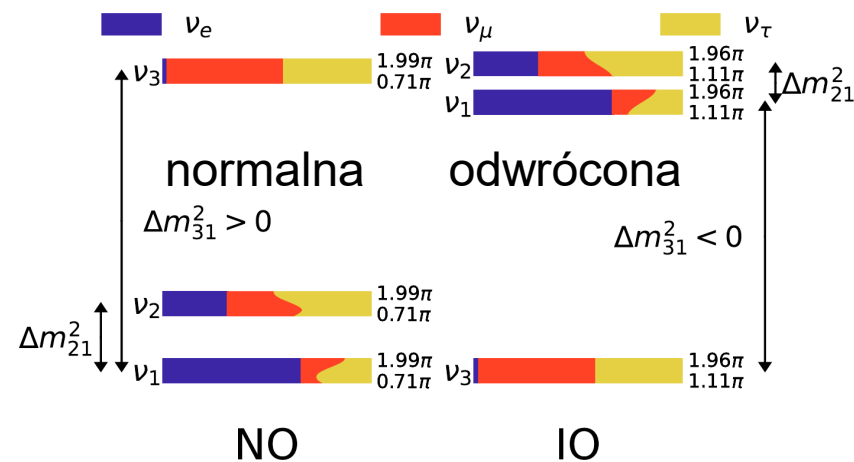
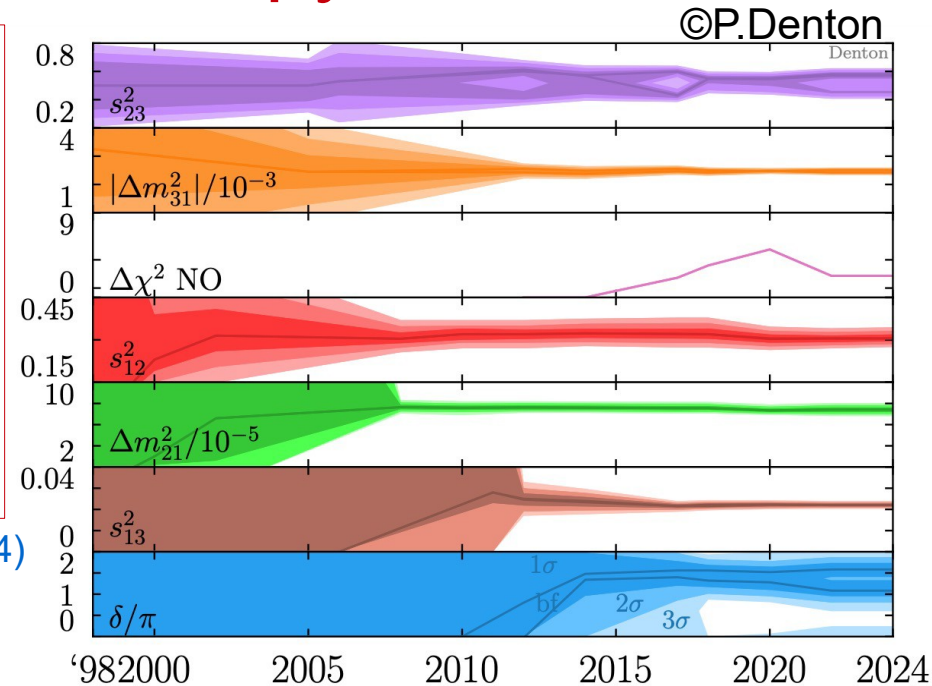
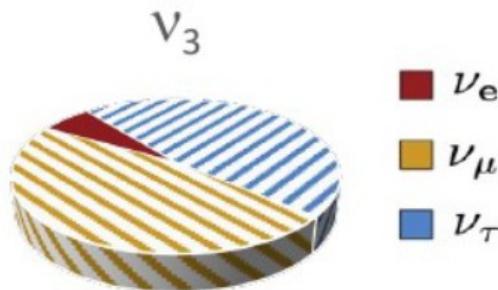
łamanie symetrii CP

- jaka jest kolejność stanów masowych?

hierarchia mas neutrin

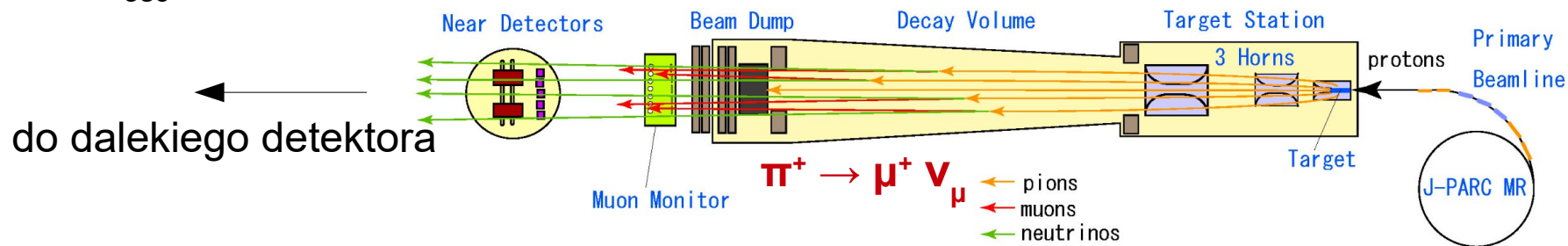
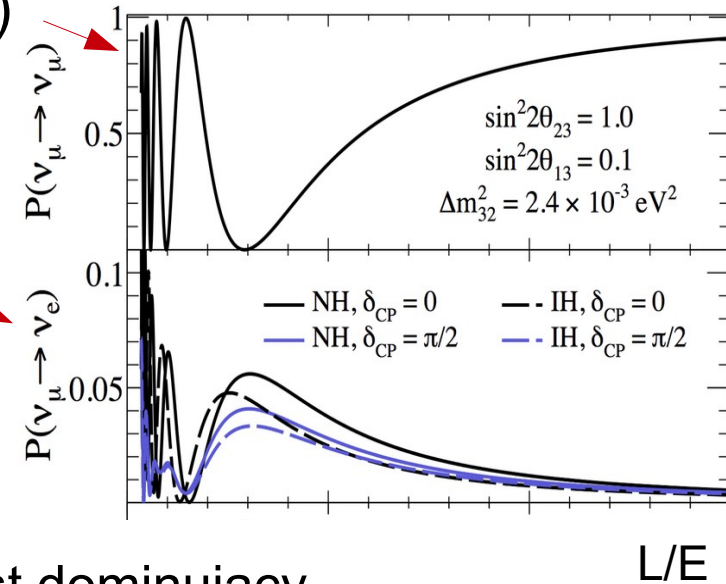
- czy kąt mieszania θ_{23} wynosi 45° , mniej czy więcej?

oktant θ_{23}



Badania oscylacji i eksperymenty z długą bazą

- zanik neutrin o danym zapachu (**disappearance**)
 - osiągalne dla wszystkich źródeł neutrin
 - nie jest wrażliwy na wszystkie parametry oscylacji
- pojawienie się neutrin o danym zapachu (**appearance**)
 - wrażliwe na wszystkie parametry oscylacji, ale trudniejsze:
 - wymaga bardzo czystej wiązki
 - realnie dostępny tylko kanał $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, który nie jest dominujący
- P_{osc} zależy od bazy L i energii $E \rightarrow$ eksperymenty z długą bazą (setki km)

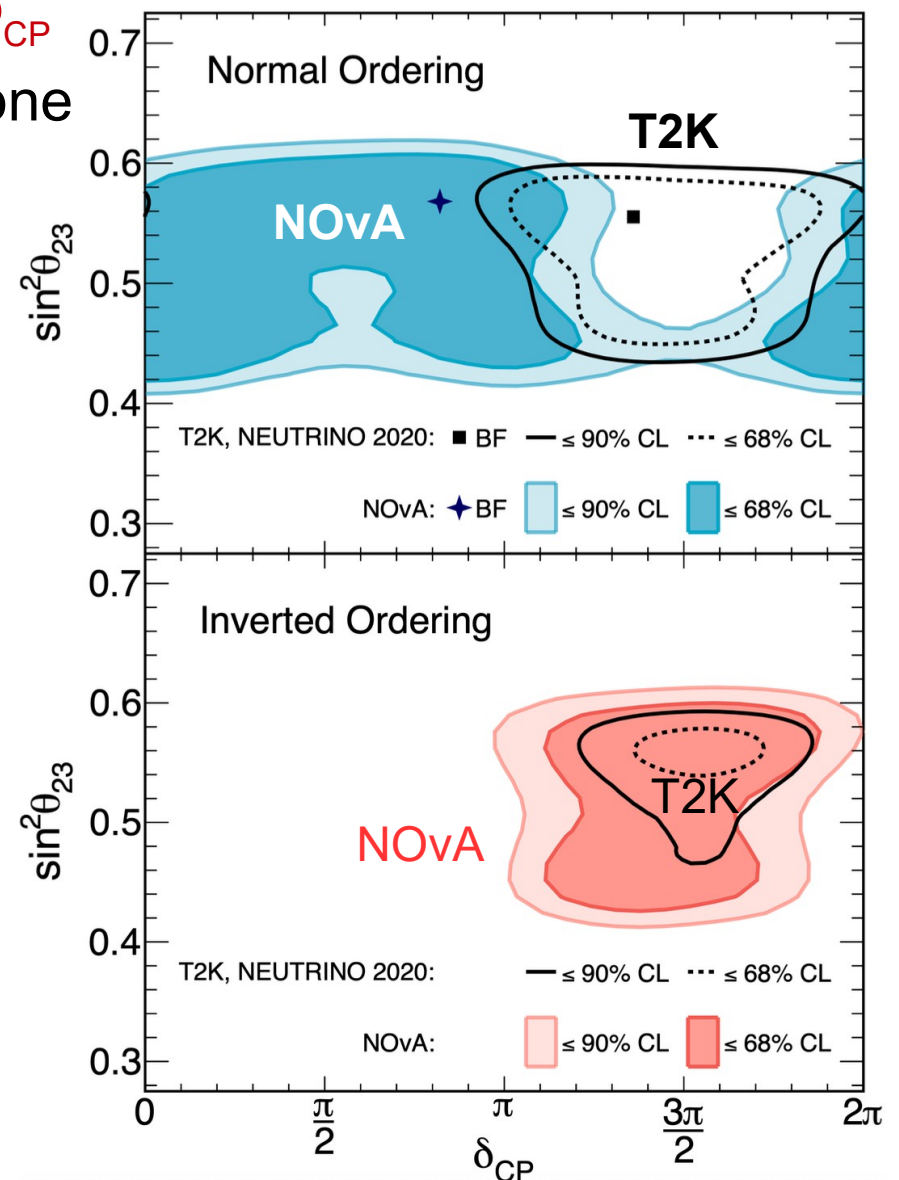


- kontrolowana **wiązka** (anty)neutrin mionowych
- **bliski** detektor – dostarcza pomiaru referencyjnego przed zajściem oscylacji (zmniejsza błąd systematyczny)
- **daleki** detektor – dostarcza pomiaru po zajściu oscylacji
- K2K, MINOS, OPERA (zakończone), T2K, NOvA (działające)

T2K i NOvA

- czułe na parametry θ_{23} , θ_{13} , Δm^2_{32} oraz δ_{CP}
- oba eksperymenty mierzą bardzo podobne wartości θ_{23} i Δm^2_{32}
oraz oba nieco preferują normalną hierarchię
- jednak niezupełnie zgadzają się w pomiarze δ_{CP} ...

ALE



T2K i NOvA

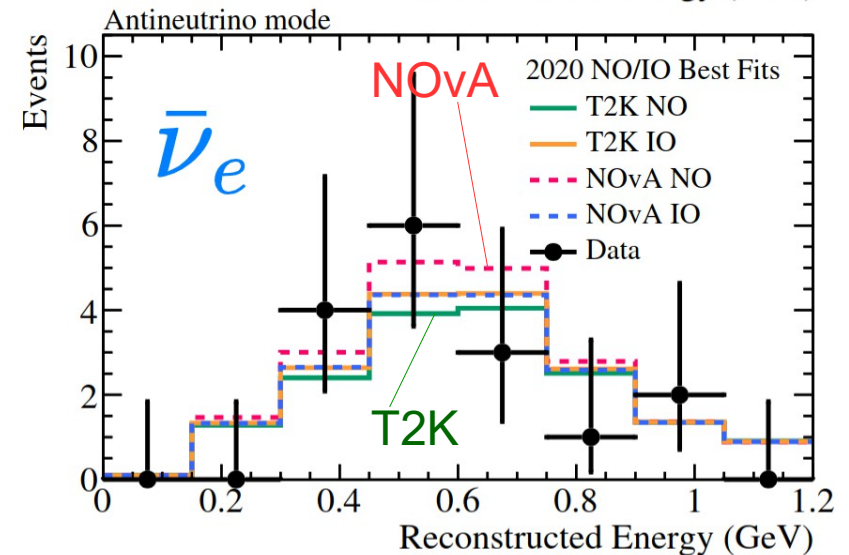
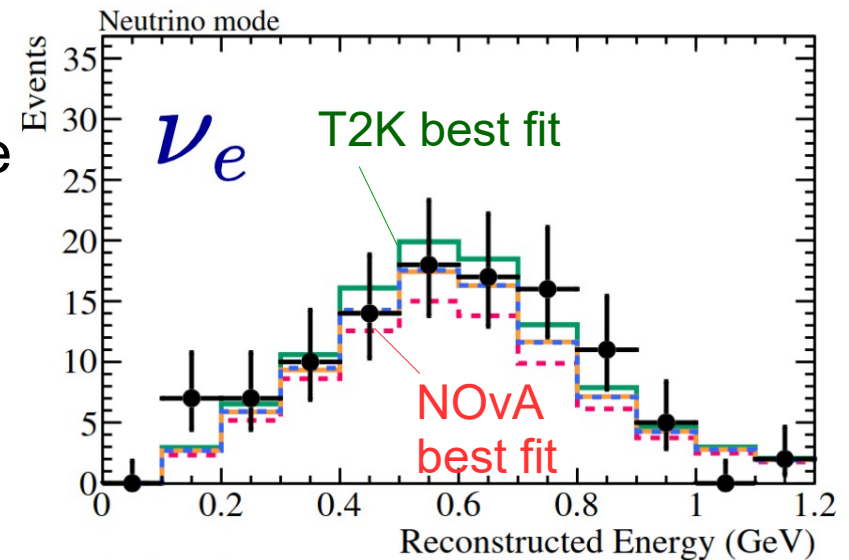
- czułe na parametry θ_{23} , θ_{13} , Δm^2_{32} oraz δ_{CP}
- oba eksperymenty mierzą bardzo podobne wartości θ_{23} i Δm^2_{32}
- oraz oba nieco preferują normalną hierarchię
- jednak niezupełnie zgadzają się w pomiarze δ_{CP} ...

ALE

- obecny wynik ma duży błąd statystyczny

	przypadki	
	appearance (ν_e)	disappearance (ν_μ)
	102+16 (+15)	357+137 (+140)
	181+32	384+106

błędy systematyczne na poziomie 5-8%



punkty – dane T2K

histogramy – przewidywania dla T2K z użyciem najlepszych dopasowań z T2K lub Novej

Jak poprawić czułość eksperymentu?

• Trudności

- mało przypadków
(błąd statystyczny)

$$N = \Phi \cdot N_{\text{det}} \cdot \epsilon_{\text{det}} \cdot \sigma$$

- niedoskonałe modele oddziaływań neutrin (σ)
- nieznajomość strumienia neutrin (Φ)
(błędy systematyczne)
- asymetria $\nu/\bar{\nu}$ pochodzi nie tylko z łamania CP, ale także z efektów propagacji przez materię (degeneracja)

Rozwiązania

- większy detektor $\rightarrow N_{\text{det}}$
- silniejsze źródło $\rightarrow \Phi$
- nowe pomiary przekrojów czynnych σ
 $\rightarrow$ „pryzmaty” neutrin
- wykorzystanie pomiarów produkcji hadronów z innych eksperymentów
- wiązki „monitorowane/znakowane”
- inne metody tworzenia wiązek
- komplementarne eksperymenty z różnymi bazami
- znajomość hierarchii mas z innych eksperymentów

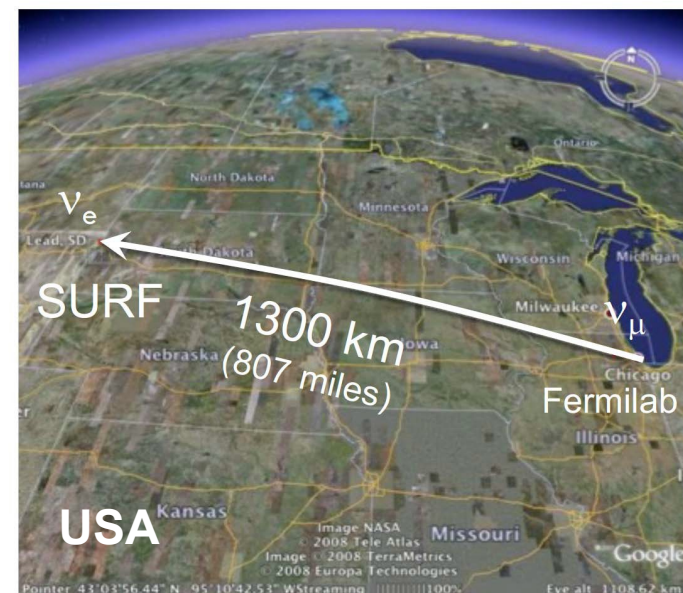


Hyper-Kamiokande i DUNE

	Hyper-Kamiokande	DUNE
baza	295 km	1300 km
energia w maksimum	600 MeV	2 GeV
spektrum wiązki	wąskie (off-axis)	szerokie (on-axis)
daleki detektor	wodny czerenkowski 186 kt* (258 kt)	2(+2) komory projekcji czasowej z ciekłym argonem po 10 kt* (17 kt)
spodziewane liczby przypadków**		
appearance	~2500	~3500
disappearance	~9000	~15000

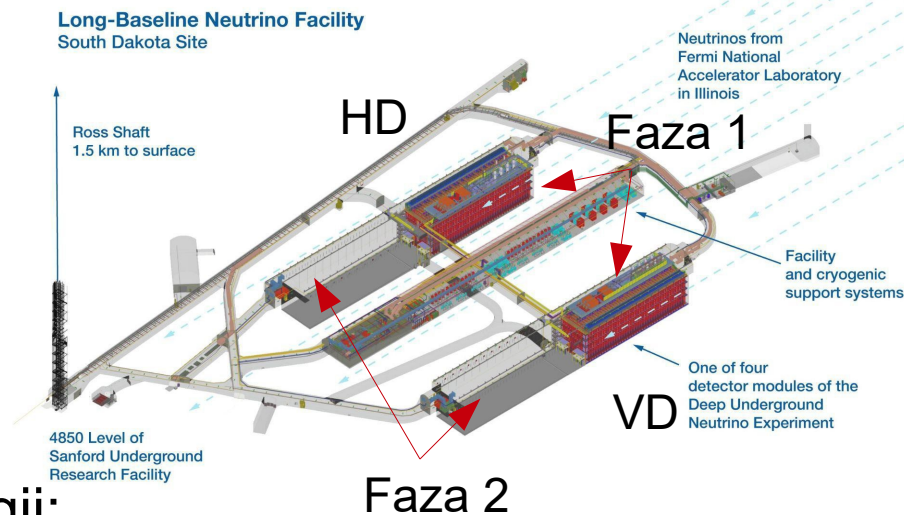
* masa czynna

** przy pewnych założeniach
co do czasu zbierania danych,
parametrów oscylacji itp.

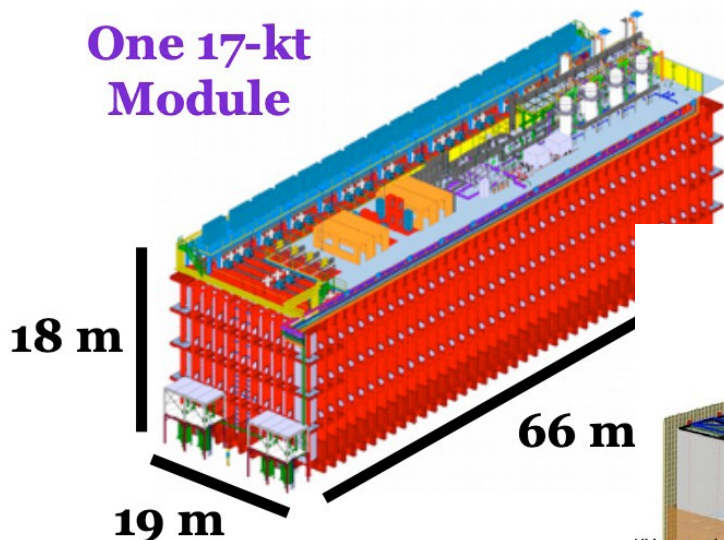


Deep Underground Neutrino Experiment

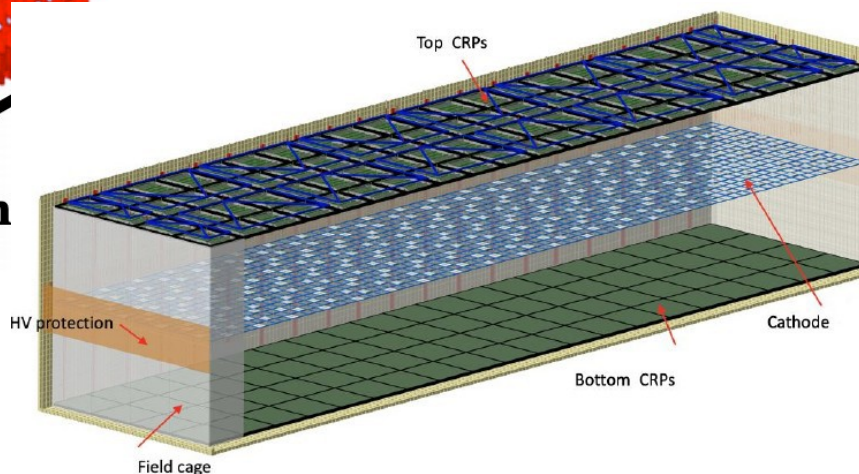
- **daleki detektor:** 2+2 moduły:
1-3: **komory projekcji czasowej**
z ciekłym argonem (po 17-kt)
(masa czynna 10 kton)
4: Module of Opportunity
– na głębokości 1.5 km
- **bliskie detektory** – 3 w różnej technologii:
LArTPC, spektrometr mionów,
detektor śladowy z kalorymetrem i polem magnetycznym (magnes KLOE)



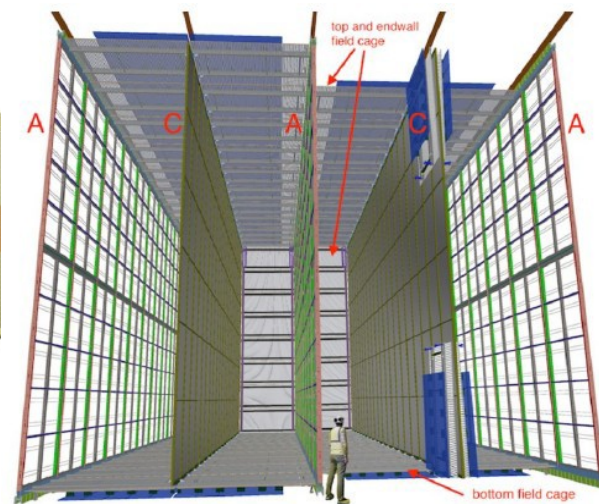
**One 17-kt
Module**



komora z pionowym
kierunkiem dryfu (VD)

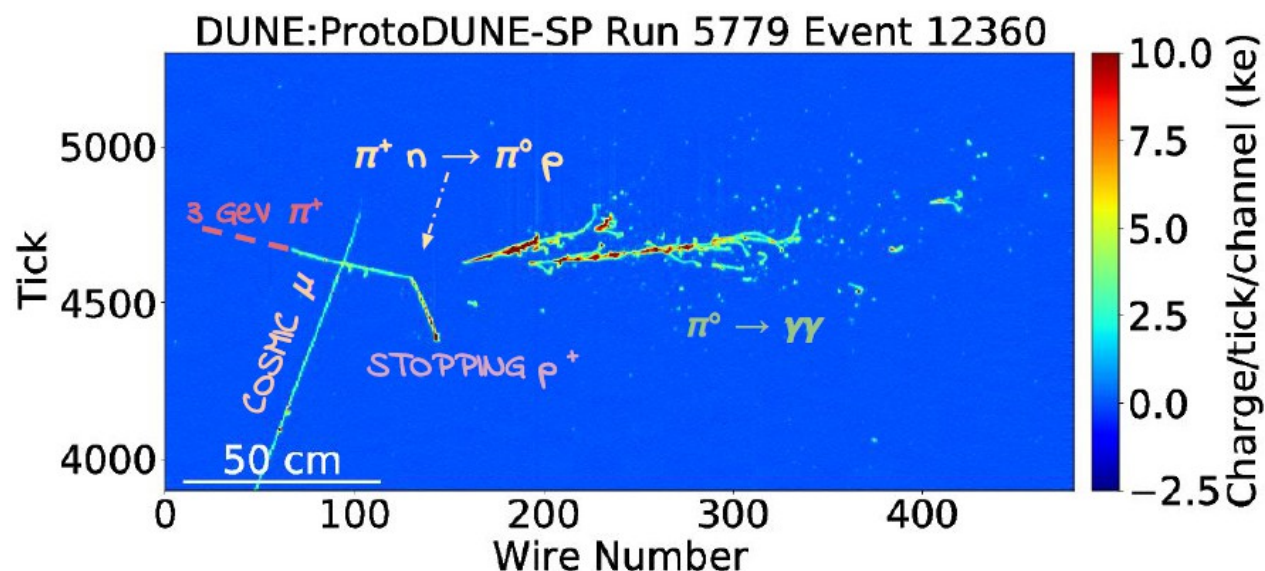
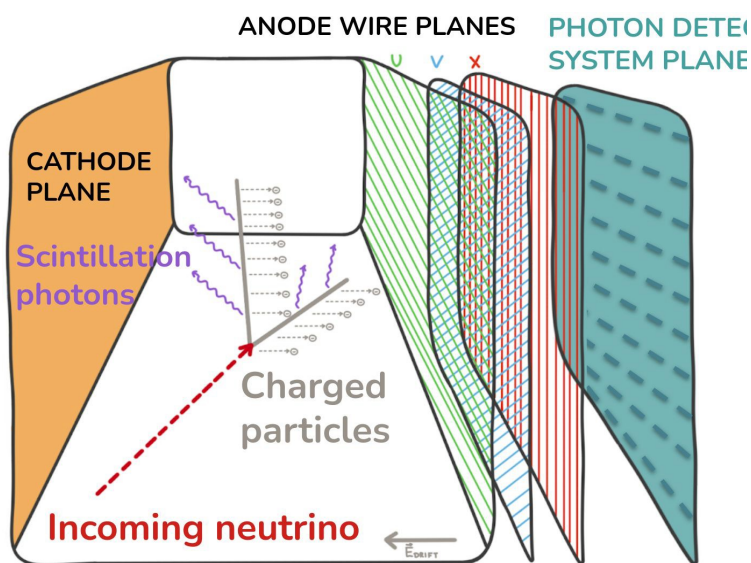


komora z poziomym
kierunkiem dryfu (HD)

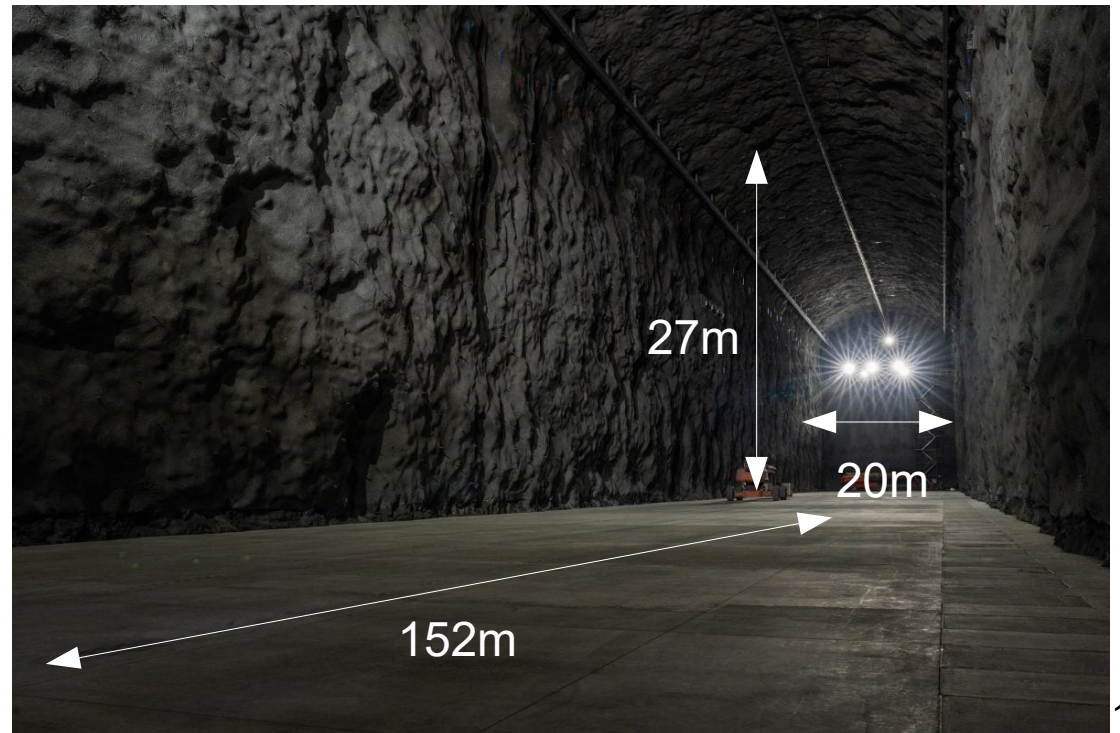
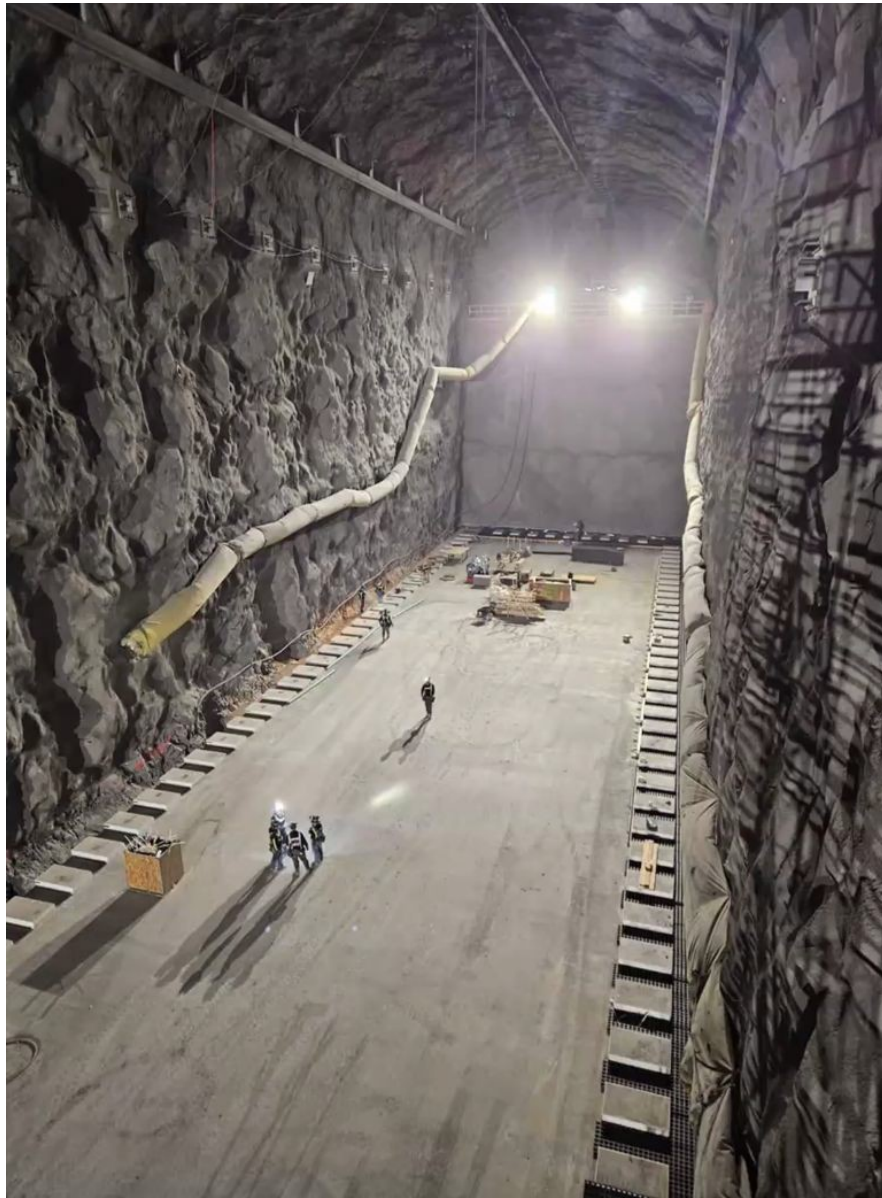


Detekcja w DUNE

- komora projekcji czasowej:
 - precyzyjny obraz przypadku oddziaływania neutrino
 - pomiar depozytów energii wzdłuż toru → identyfikacja cząstek
 - pomiar całkowitej zdeponowanej energii
- światło scyntylacyjne argonu → układ wyzwalania, czas przypadku
- wymaga bardzo czystego argonu
 - długość dryfu 3.5 m dla HD, 6.5 m dla VD



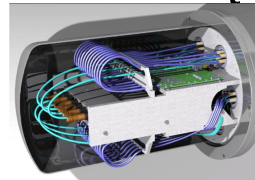
Wielka dziura



- 2 tunele detektorowe:
- wysokość ok. 8-9 pięter
 - usunięto ok. 800.000 ton skał

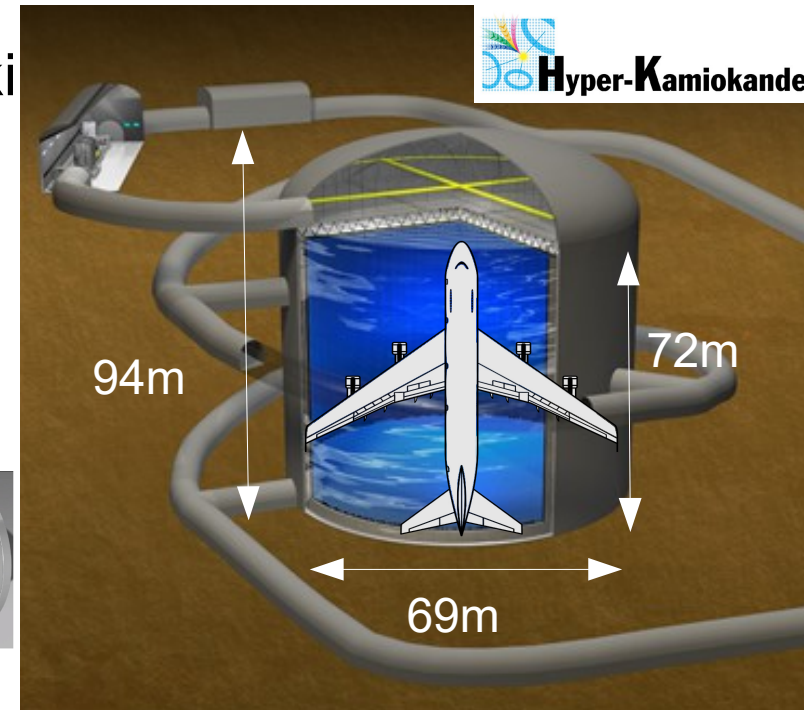
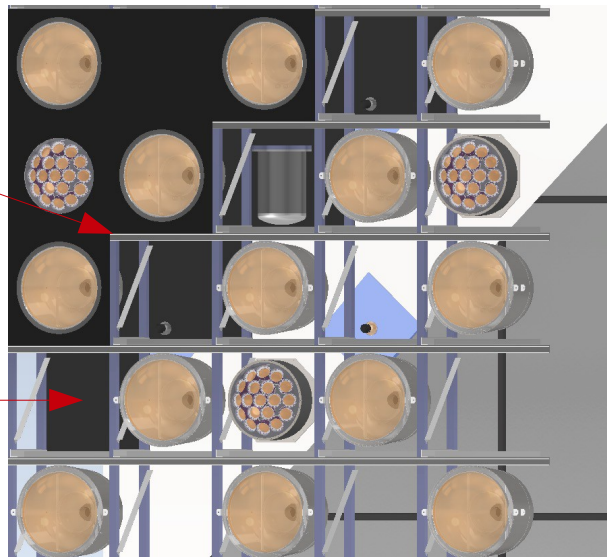
Eksperyment Hyper-Kamiokande

- **daleki detektor:** wielki detektor czerenkowski 258 kton (masa czynna 186 kton)
- na głębokości 600 m
- ponad 24 000 fotopowielaczy do obserwacji światła czerenkowskiego
- elektronika odczytu zainstalowana pod wodą (wkład PW, UJ, AGH)
- optyczny podział na wewnętrzny i zewnętrzny detektor
- jeden z systemów kalibracji (akcelerator liniowy) zaprojektowany i produkowany w NCBJ



stalowa rama
detektora,
siatka
70 cm x 70 cm

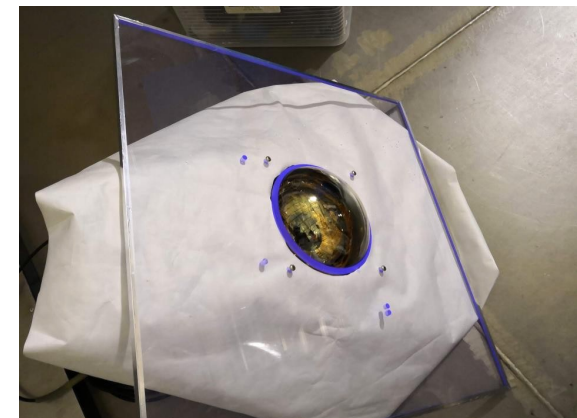
arkusze czarnej folii
oraz folii Tyvek



- **bliskie detektory**
 - obecne detektory T2K (INGRID i unowocześniony ND280 z polem magnetycznym)
 - nowy 1-ktonowy detektor czerenkowski w odległości 1 km

Detektory światła w HK

- 20 000 półmetrowych fotopowielaczy
 - nowoczesne produkty Hamamatsu (Box&Line) o podniesionych parametrach (dwukrotnie lepsze od używanych w Super-Kamiokande):
wydajność kwantowa $\sim 24\%$,
rozdzielczość ładunkowa i czasowa (1.5 ns)
 - poziom szumu ciemnego 4 kHz (jak w SK)
 - lepsza odporność na ciśnienie
- ~ 800 multi-PMTs: 19x8-cm fotopowielaczy we wspólnej obudowie
 - dodatkowa informacja o kierunku fotonu
 - lepsza rozdzielczość czasowa
- ~ 3600 8-cm fotopowielaczy z przesuwaczem długości fali w zewnętrznym detektorze
- akrylowe osłony zabezpieczające przed skokiem ciśnienia

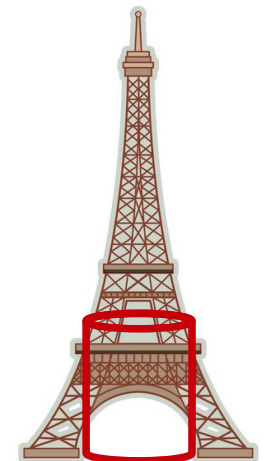
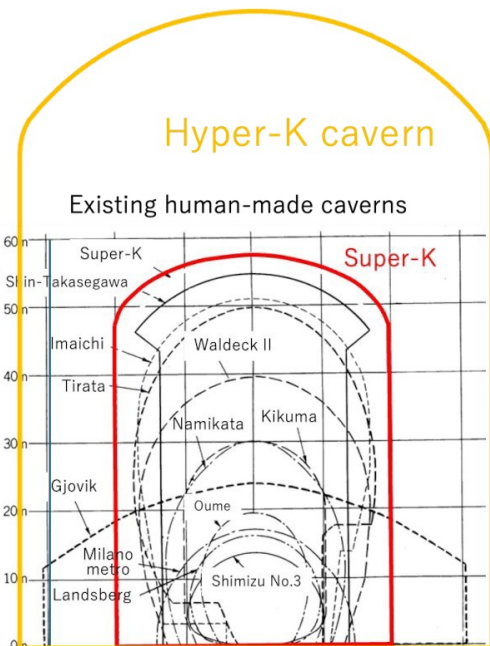


Jeszcze większa dziura

【2023/07/13】 Cavern for water purification system (~1/2 of Super-K)



www.youtube.com/watch?v=SrQlqsSHOtM



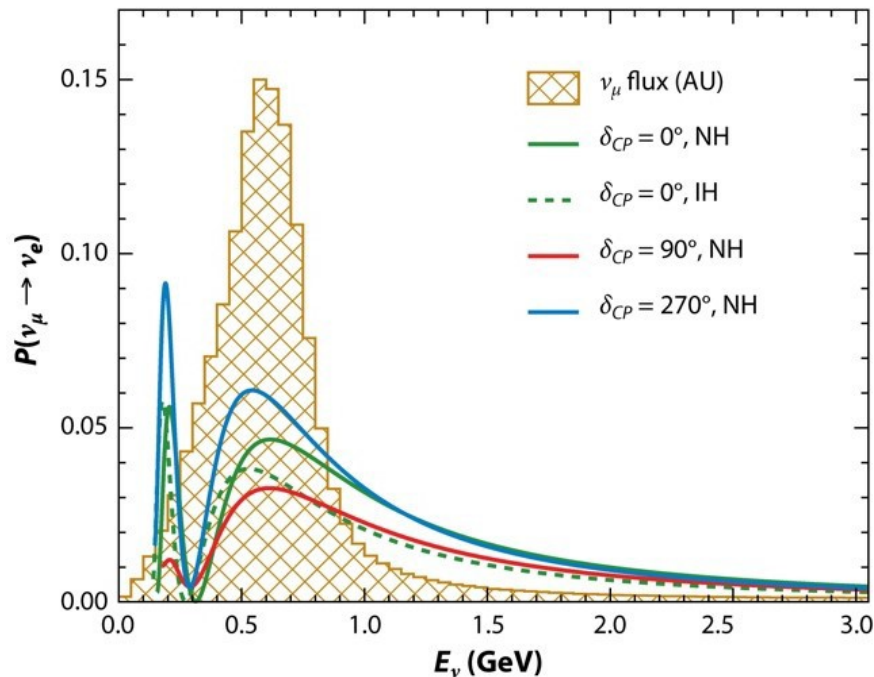
©freepik

Megawatowe wiązki

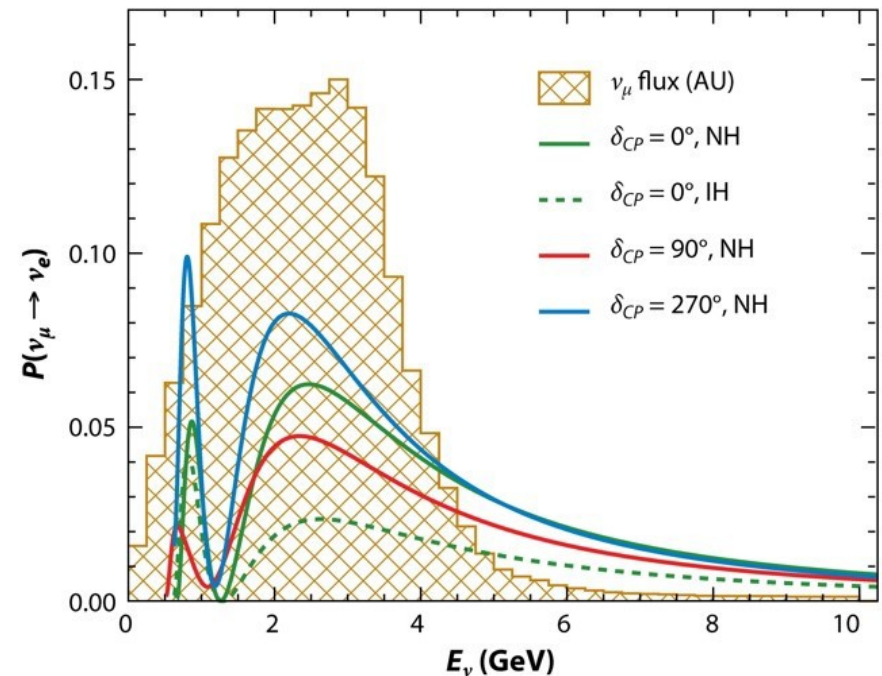


Hyper-Kamiokande

- J-PARC, Main Ring: 1.3 MW
- **wiązka wąska (narrow band)**
i metoda **off-axis**
→ większość zdarzeń blisko
maksimum oscylacji

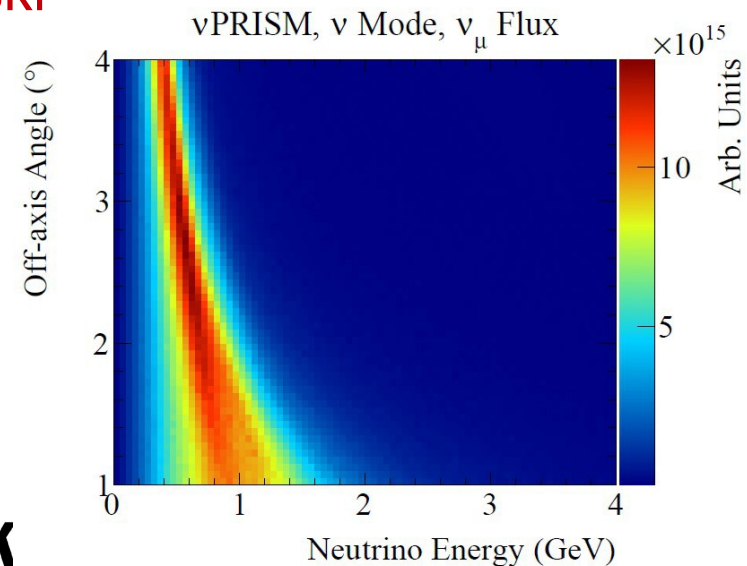
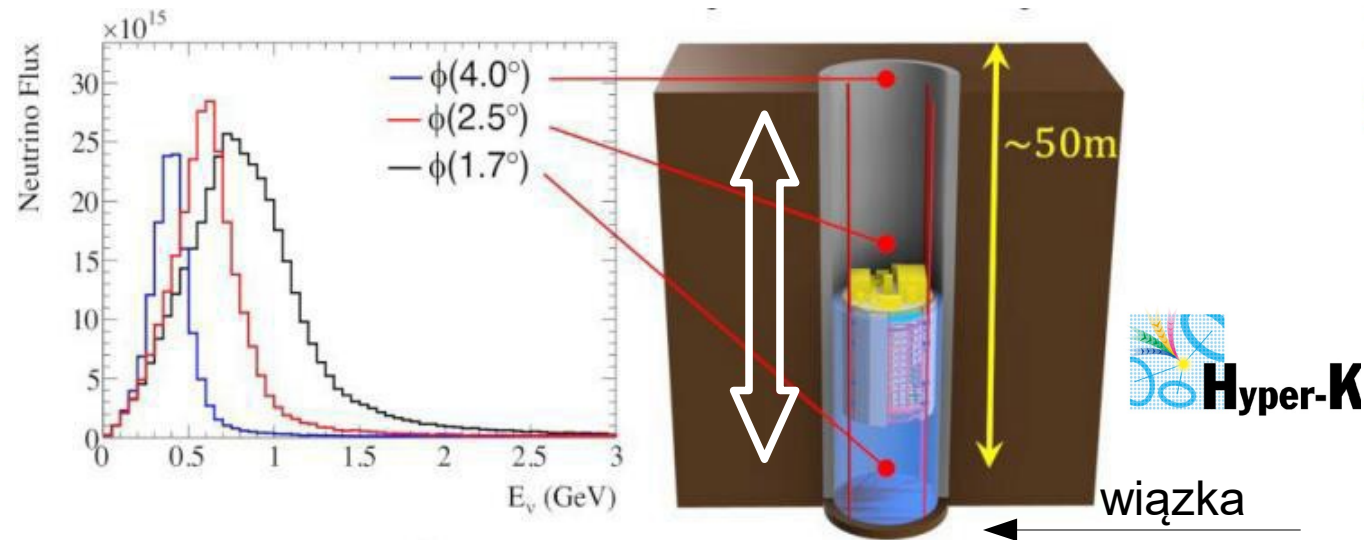


- Fermilab, LBNF: faza 1: 1.2 MW
– faza 2: 2.4 MW
- **wiązka szeroka (broad band)**
→ pokrycie pełnego okresu
oscylacji

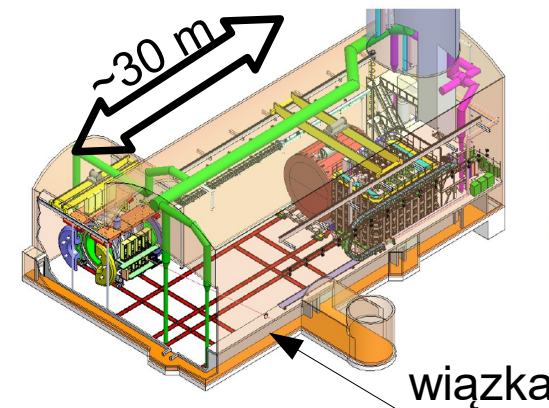


„Pryzmaty” neutrinowe

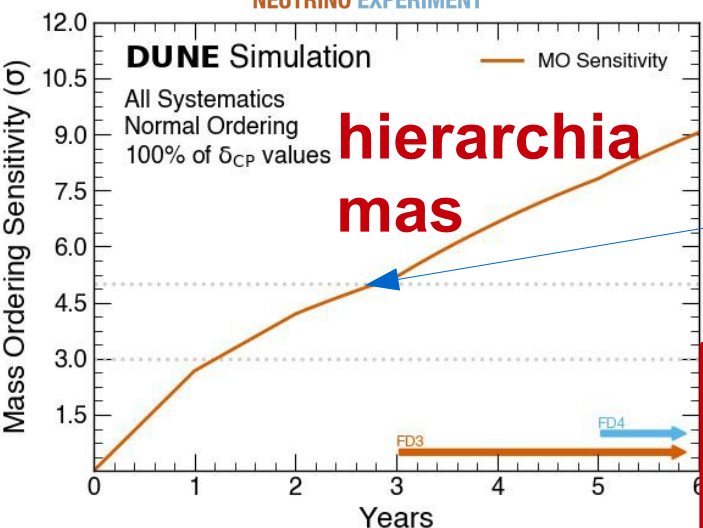
- ruchome bliskie detektory, obserwujące wiązkę neutrin **pod różnymi kątami**
 - neutrina lecące pod różnymi kątami mają różne widmo energii (efekt off-axis, wynikający z kinematyki rozpadu pionu w locie)
 - górna granica energii dla neutrin emitowanych pod danym kątem
 - dla **HK**: **pośredni detektor wodny czerenkowski** w odległości 850 m od tarczy kąty off-axis 1.6° - 4°



- dla **DUNE**: **jeden z bliskich detektorów** (śladowy, SAND) w odległości 574 m od tarczy, kąty off-axis 0° - 3°

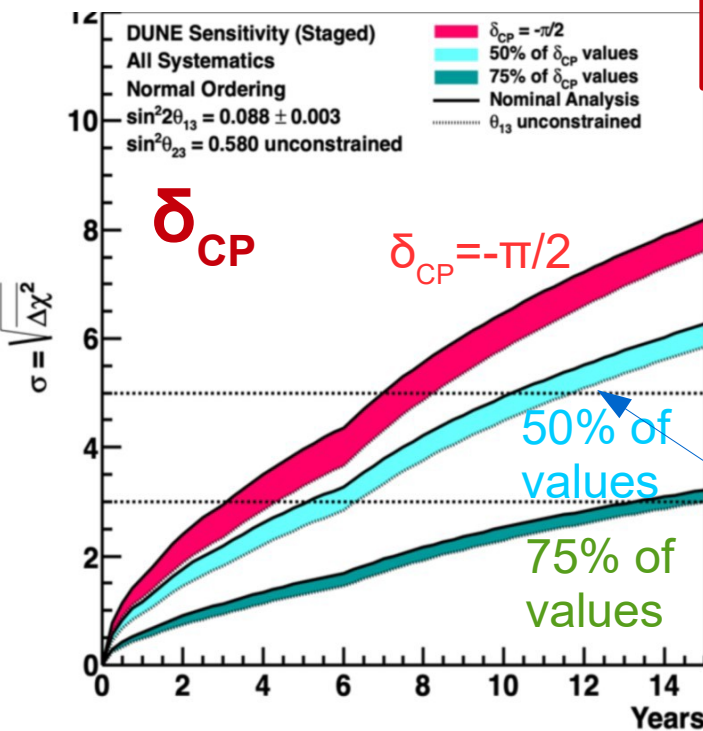


DUNE
DEEP UNDERGROUND
NEUTRINO EXPERIMENT

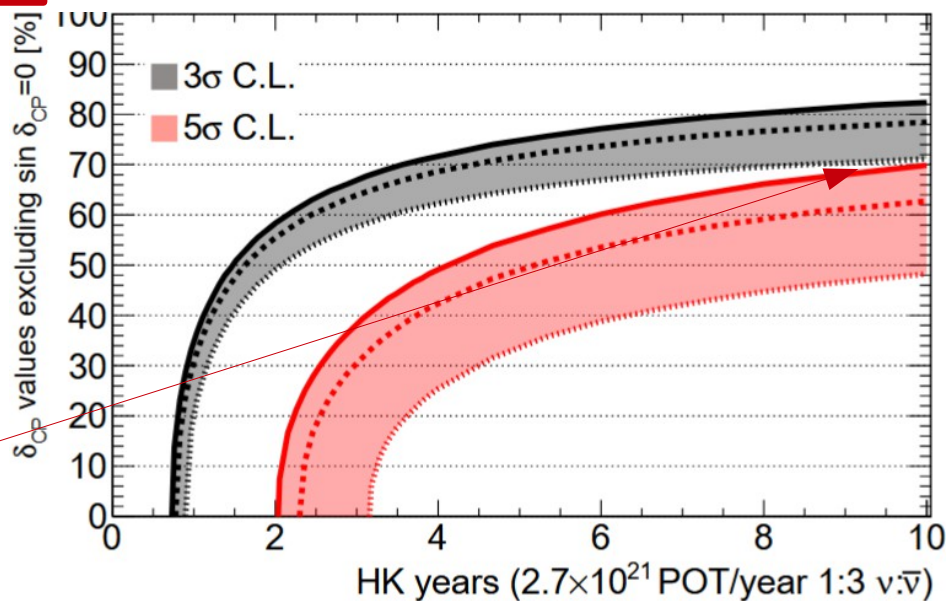
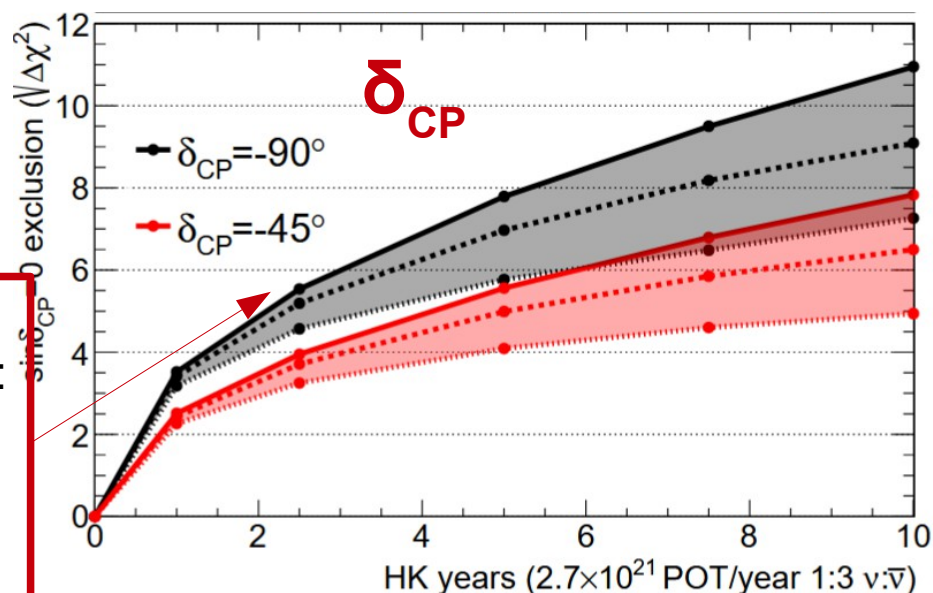


DUNE:
odkrycie
hierarchii mas
już w fazie I

HYPER-K:
jeśli hierarchia znana:
2-3 lata by wykluczyć
zachowanie CP z 5σ
(dla prawdziwej
wartości $\delta_{CP} = -\pi/2$)

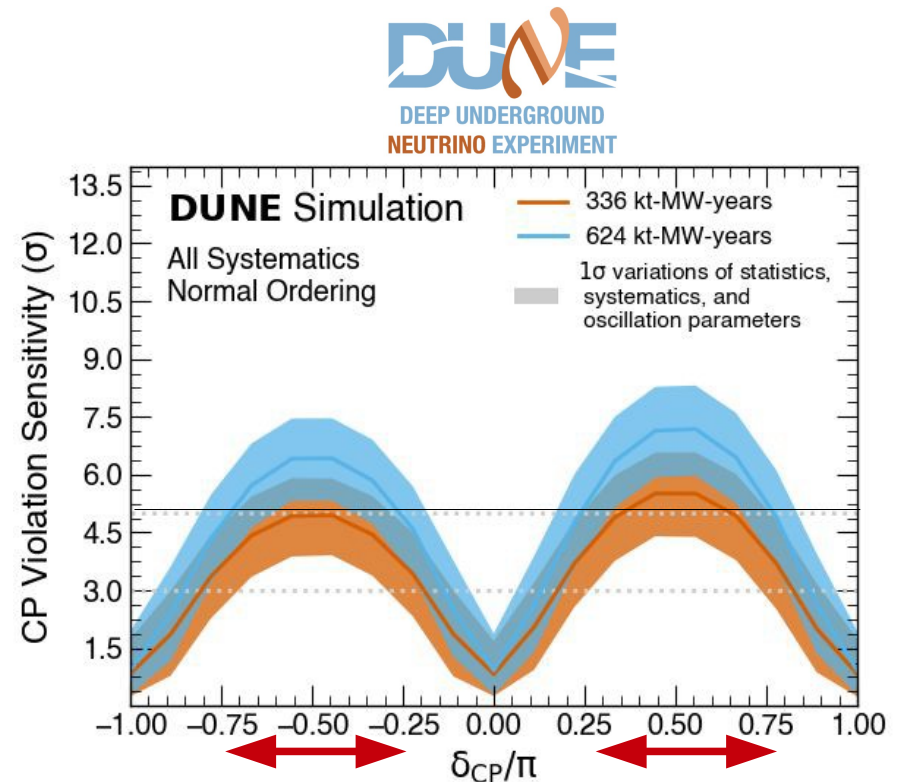
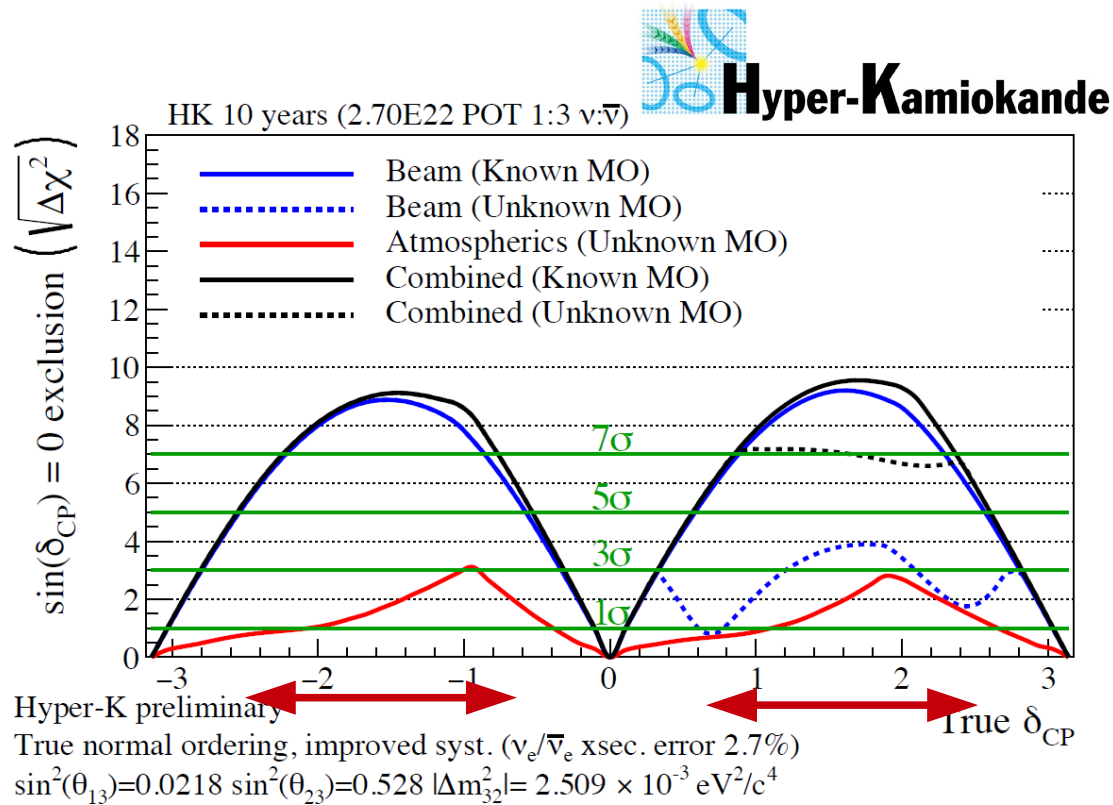


Po 10 latach
czułość na
poziomie 5σ
dla 50% możliwych
wartości δ_{CP}
w DUNE
i 60% w Hyper-K



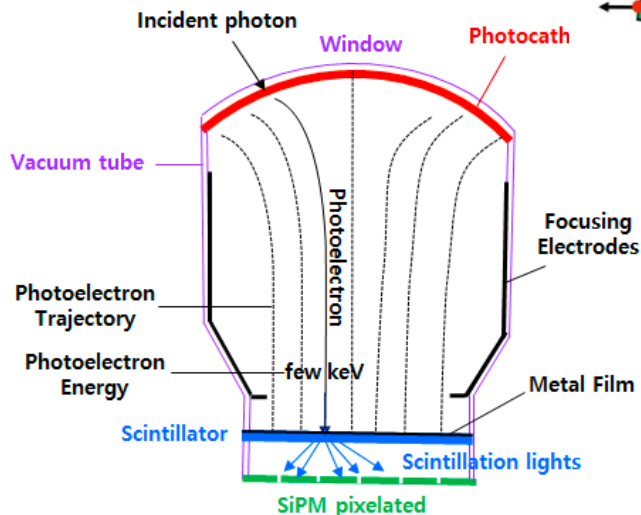
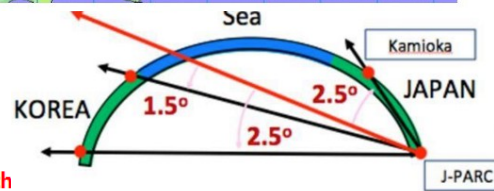
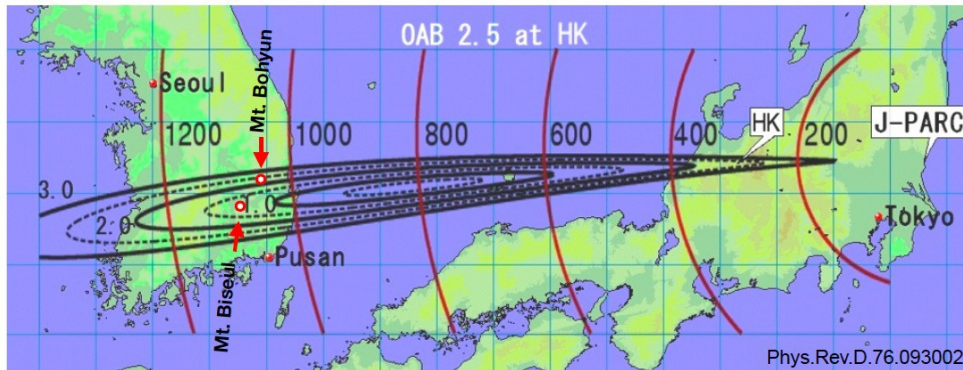
Co oznacza 50% lub 60% możliwych wartości?

- prawdziwe (realizowane przez naturę) δ_{CP} może się zawierać między $-\pi$ a π (lub 0 a 2π)
- maksymalny efekt (i największa czułość) dla $\delta_{CP} = -\pi/2$ lub $\delta_{CP} = \pi/2$
- im bliżej wartości zachowującej CP (0 lub $\pm\pi$), tym gorsza czułość



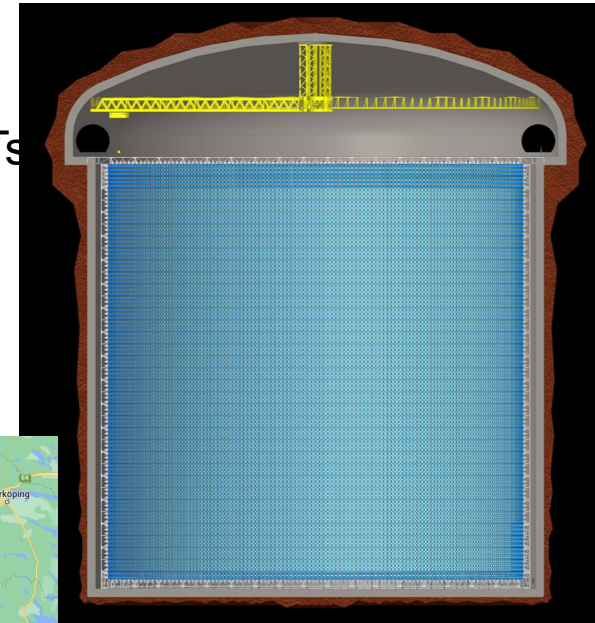
Inne propozycje eksperymentów z długą bazą

- **Korea Neutrino Observatory** – jak Hyper-K, ale z innymi fotodetektorami: Hybrid Silicon Photon Multiplier
 - rozdzielczość PE podobna do SiPM
 - rozmiar dużego PMT



luty 2025:
„Ministry of
Science and ICT
did not allocate
the budget needed
for the project”

- **ESSnuSB** – podobny do Hyper-K
 - bliskie detektory sFGD i wodny
 - neutrina z ESS (rozbudowanego)
 - daleki detektor
 - 74 x 74 m
 - 2-270 kt
 - 2-38k 20” PMTs



grant EU-Horizon
na lata 2023-2026
(design study)

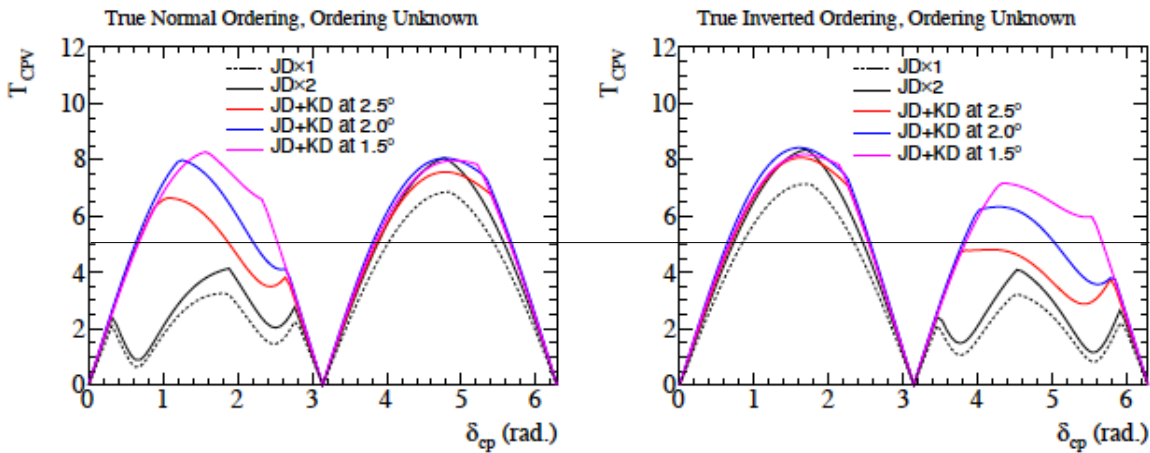
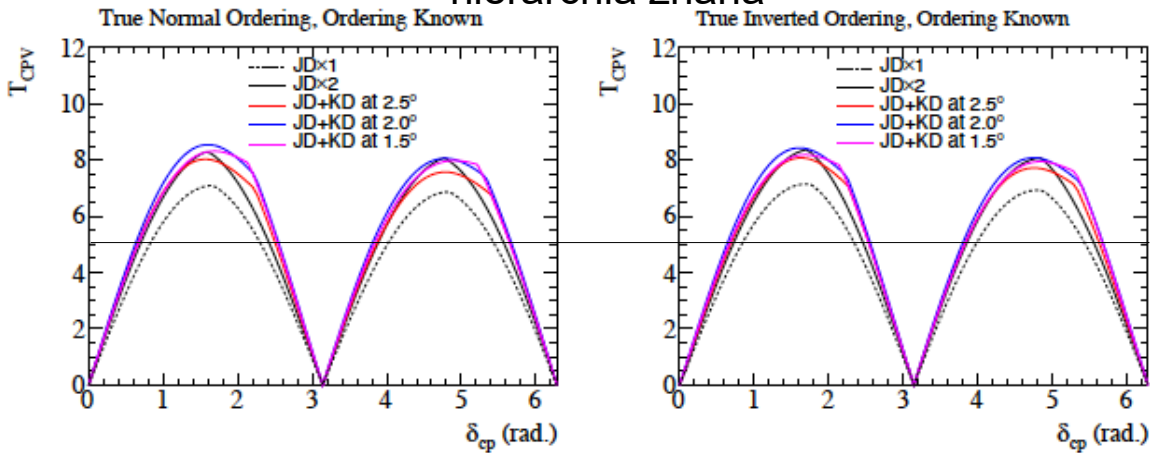
Czułości

- Korean Neutrino Observatory

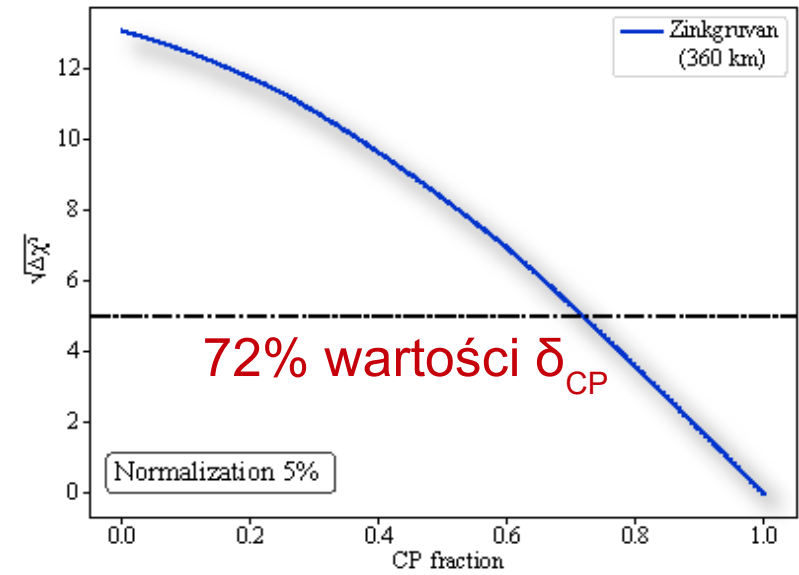
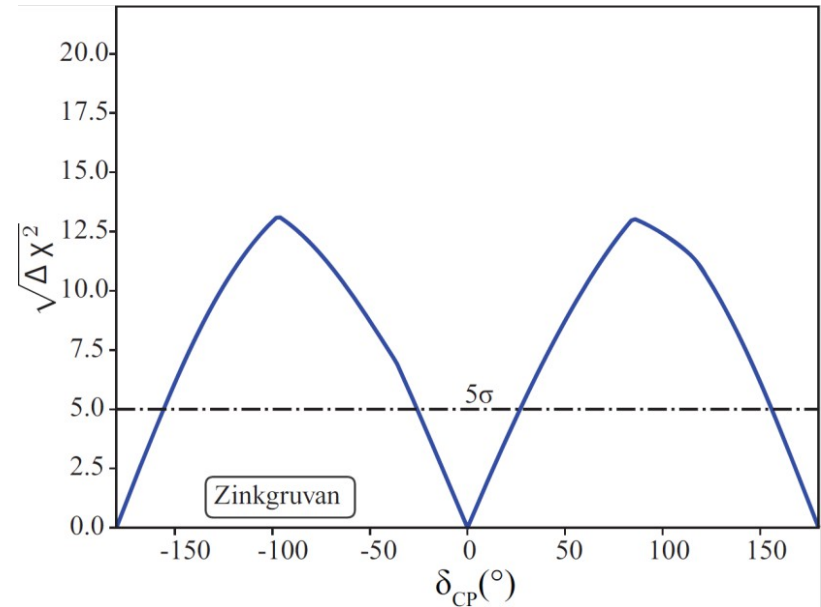
- ESSnuSB

- HK
- HK x2
- HK+KNO (różne konfiguracje)

hierarchia znana

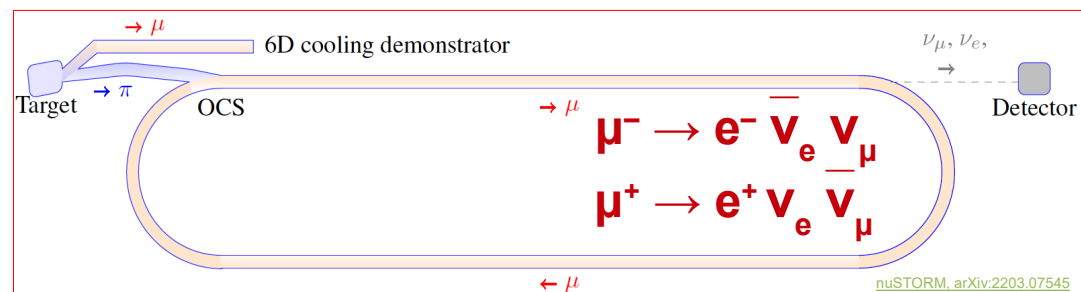
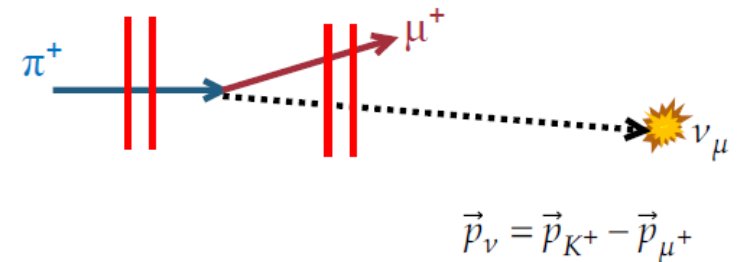


hierarchia nieznana



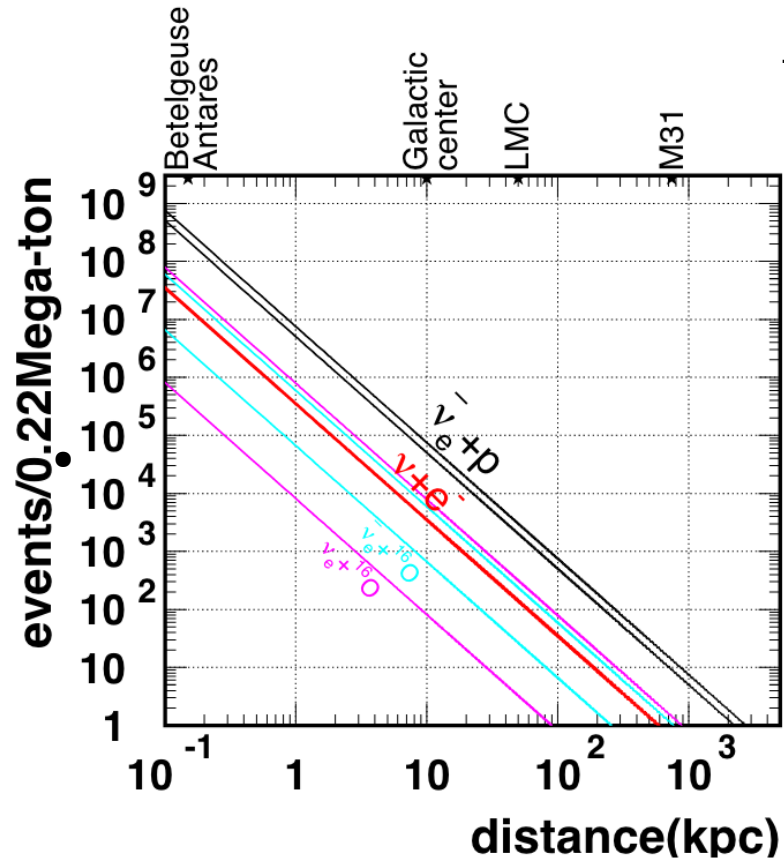
Inne pomysły na wiązki neutrin

- wiązki „monitorowane” i „znakowane”
 - obecnie energia neutrina rekonstruowana z pomiarów **produktów oddziaływania** – duże niepewności (pęd Fermiego, efekty jądrowe, efekty detektorowe, metoda rekonstrukcji → rozdzielczość $\sim 10\%$)
 - pomysł: rekonstrukcja z użyciem **pionu-rodzica i mionu/elektronu-brata**
 - spodziewana rozdzielczość $< 1\%$
 - duże wyzwanie: detektory w obszarze wysokiego strumienia cząstek wewnątrz rury rozpadowej
 - redukcja strumienia poprzez wykorzystanie „slow extraction”, selekcja pędowa cząstek rodziców
 - nie da się zastosować w eksperymentach oscylacyjnych, ale można użyć do pomiarów przekrojów czynnych
 - pierwsze pomysłne testy: ENUBET i NuTAG, proponowany eksperyment nuSCOPE [arXiv: 2503.2158](#) [EPJC 84 \(2024\) 1024](#)
- nuSTORM – użycie neutrin z rozpadów mionów [arXiv: 2505.06137](#)



Neutrino z wybuchu supernowej

- ν_e z neutronizacji
 - elastyczne rozpraszanie na elektronach w HK (informacja o kierunku, dokładność 1-1.3° spodziewana dla supernowej @10 kpc)
 - odwrotny rozpad beta na Ar dla DUNE
- ν_e i $\bar{\nu}_e$ termiczne – odwrotny rozpad beta w HK/DUNE



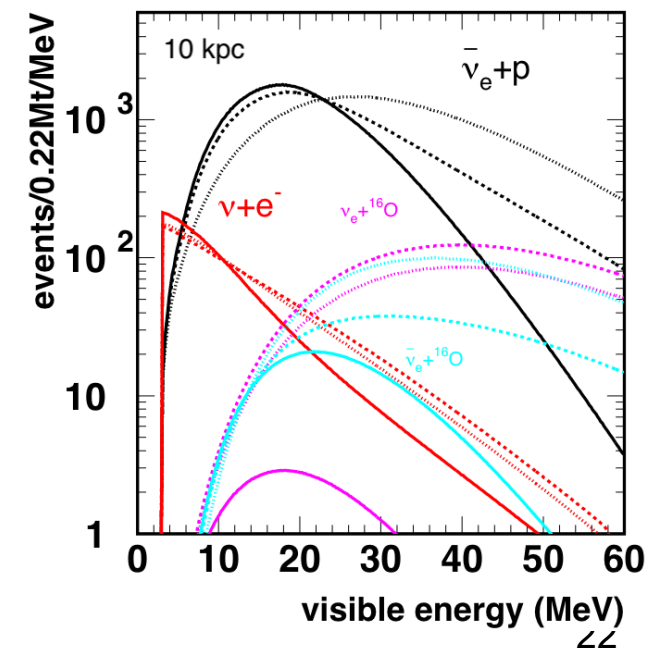
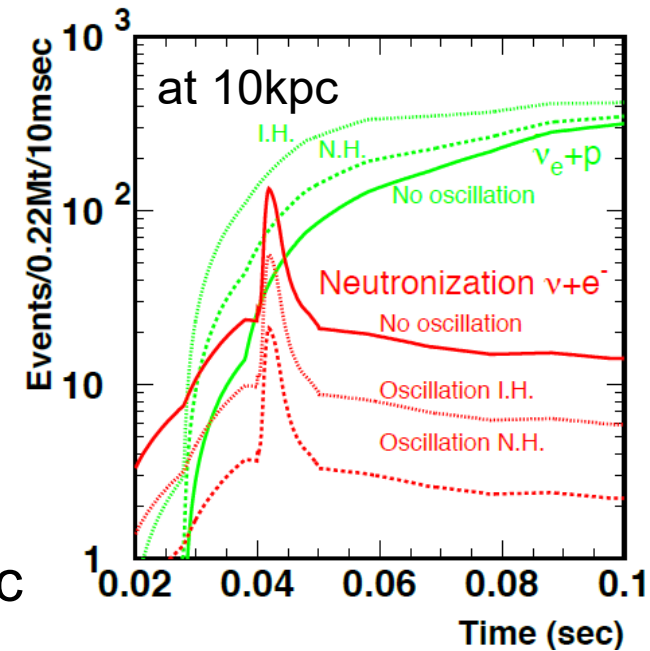
przewidywania:

- ~70k przypadków @10kpc
- 2-3k (SN1987a) w HK
- ~3.8 k @10kpc w DUNE

studia

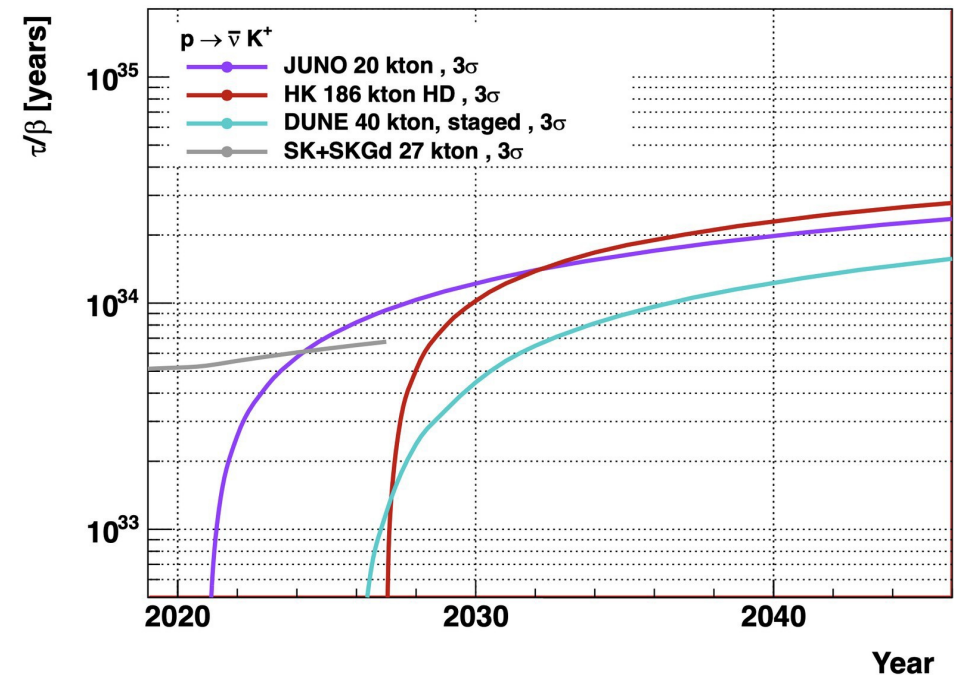
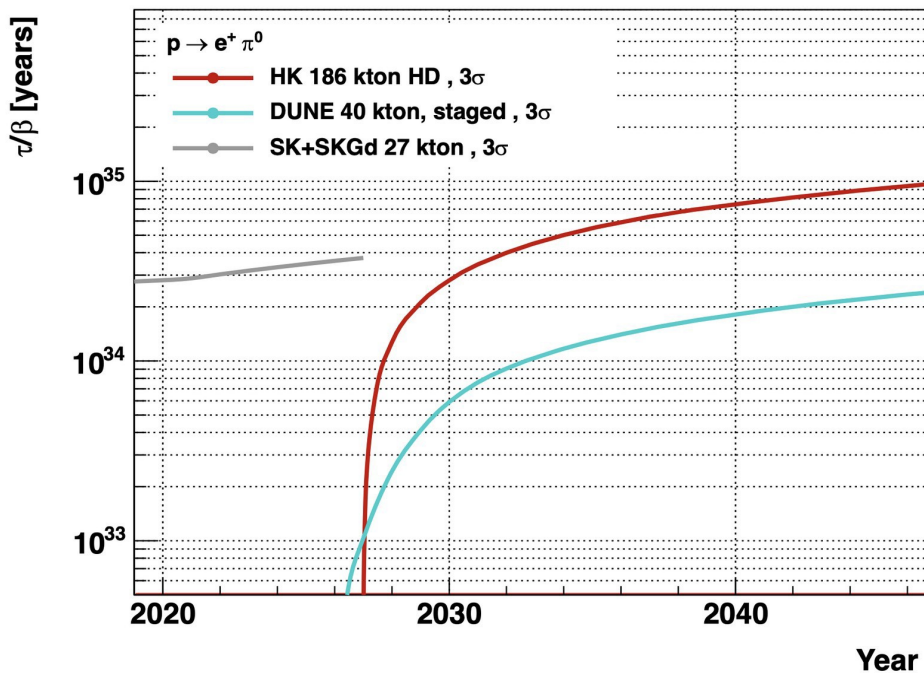
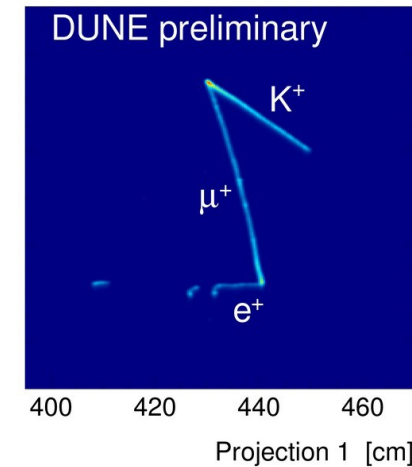
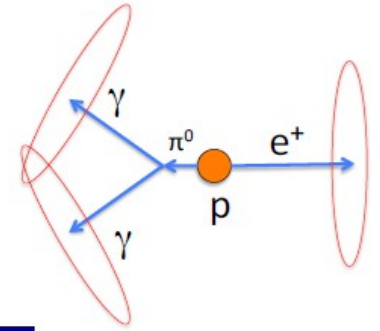
- oscylacji i własności neutrin (masa, hierarchia)
- modeli wybuchu supernowych

Wczesny sygnał dla teleskopów



Poszukiwanie rozpadu protonu

- testowanie teorii wielkiej unifikacji, przez rozpady np.
 - $p \rightarrow e^+ \pi^0$: idealny dla detektora czerenkowskiego
 - $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$: lepszy dla detektora śladowego
- Przewidywane dolne granice na czas życia (90% C.L., po 10 latach)
 - $6 \cdot 10^{34}$ lat dla $p \rightarrow e^+ \pi^0$
 - $2 \cdot 10^{34}$ lat dla $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$
- ok. 1 rząd wielkości dla większości innych kanałów



Podsumowanie

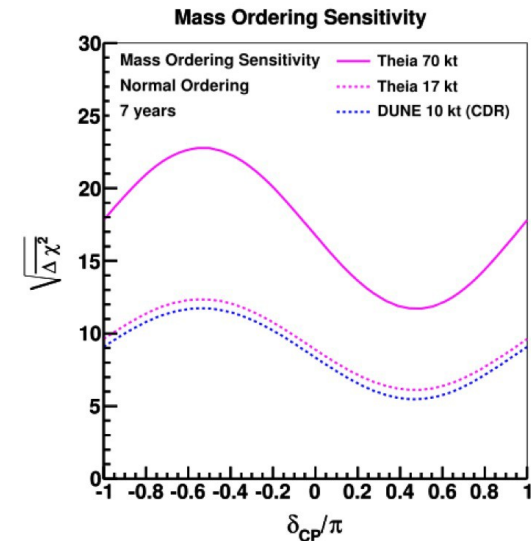
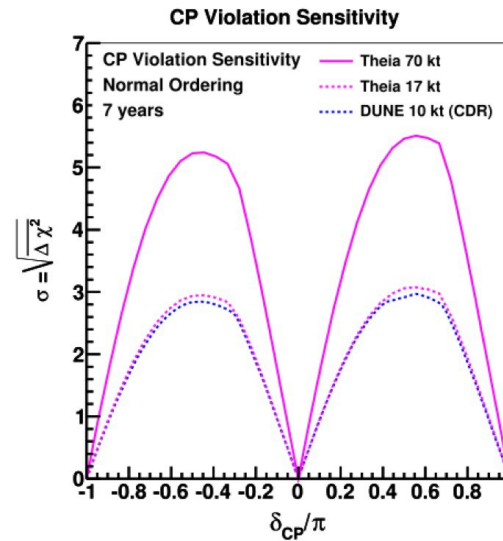
- 25 lat po odkryciu oscylacji wkraczamy w **erę precyzyjnych pomiarów**
- nowe eksperymenty **Hyper-Kamiokande i DUNE** przeanalizują dużo większe liczby przypadków oddziaływań neutrin
 - start HK w 2028, DUNE w 2030!
 - istotny wkład polskich grup w HK (elektronika, fotopowielacze, kalibracja)
- coraz ważniejsza staje się **kontrola niepewności systematycznych**
 - pomiary przekrojów czynnych, nowe pomysły na tworzenie wiązek i detekcję neutrin
- w ciągu 10-20 lat mamy szansę poznać odpowiedzi na kluczowe pytania
 - **hierarchię mas neutrin**
 - **oktant kąta mieszania θ_{23}**
 - **łamanie symetrii CP**
- DUNE i HK będą badać też neutrina słoneczne, z supernowej itd.
- inne eksperymenty badają pozostałe niewiadome dotyczące neutrin
 - istnienie tzw. **neutrin sterylnych**
 - **absolutną** masę neutrin
 - **naturę** neutrin (Diraca/Majorany)

II EU Workshop on Water Cherenkov
Experiments for Precision Physics,
Kraków, 17-19 września
<https://indico.oa.uj.edu.pl/event/4/>

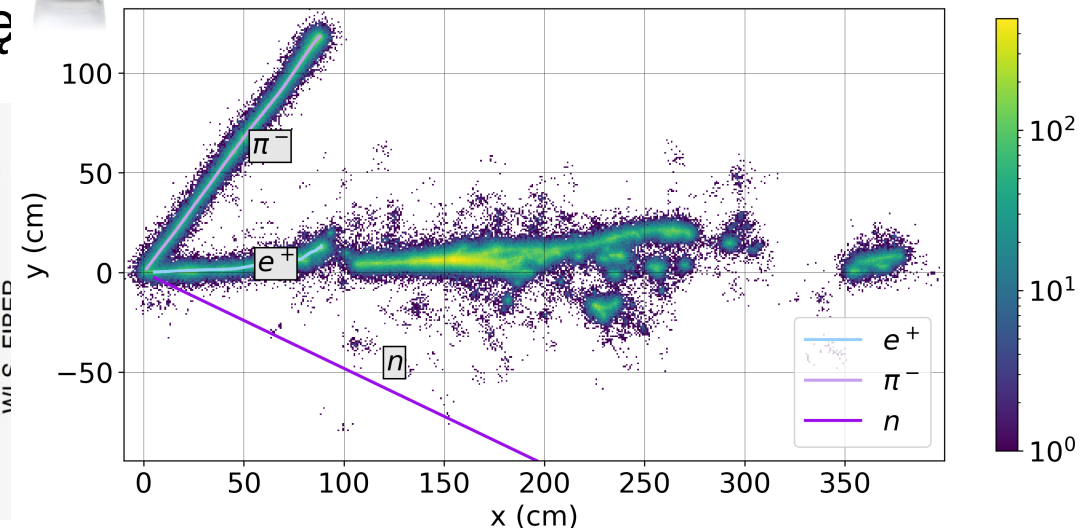
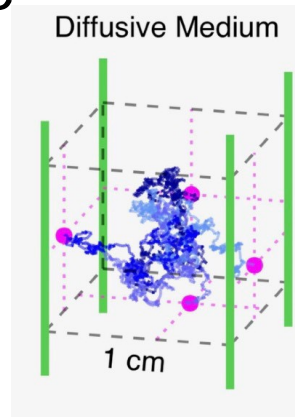
Slajdy dodatkowe

THEIA i LiquidO

- THEIA – obserwacja światła
 - scyntylacyjnego – znakomita rozdzielczość
 - czerenkowskiego – informacja o kierunku
- polepszenie identyfikacji cząstek, większa czułość
- czwarty moduł dla DUNE?



- LiquidO – ośrodek rozpraszający światło, z długą drogą na absorpcję i krótką na rozpraszanie → „zamknięcie” światła w pewnej objętości
- odczyt przez włókna WLS i SiPM



Mieszanie i oscylacje neutrin

- stany własne zapachu są liniową kombinacją stanów własnych masy $\rightarrow$ macierz mieszania Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata
 - sparametryzowana przez **3 kąty mieszania** i fazę łamania CP δ_{CP}

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{-i\delta_{CP}} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} + \text{Majorana phases}$$



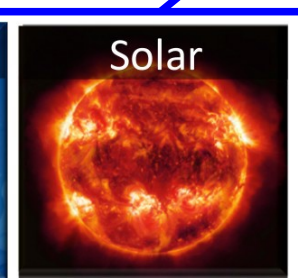
Atmospheric



Accelerator



Reactor



Solar

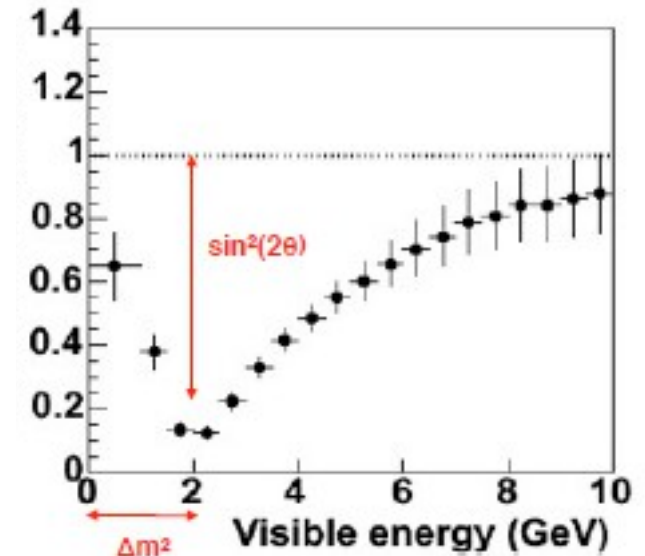
$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \Re(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \Delta m_{ij}^2 \frac{L}{4E} \pm 2 \sum_{i>j} \Im(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \Delta m_{ij}^2 \frac{L}{4E}$$

- parametry: energia neutrin E , baza (odległość) L , $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$
- efekty materii (lub efekt MSW)
 - obecność elektronów modyfikuje propagację składowej elektronowej
 - możliwe rezonansowe wzmocnienie oscylacji

Disappearance i appearance

- **disappearance:**

- obserwacja tego samego zapachu neutrin, jaki został wyprodukowany:
 $\nu_e \rightarrow \nu_e, \bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e, \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$
- minimum w stosunku obserwowanych i spodziewanych liczb przypadków $\rightarrow$ informacja o kącie mieszania i Δm^2
- zachowanie symetrii CPT wymaga tego samego prawdopodobieństwa „przeżycia” dla neutrin i antyneutrin



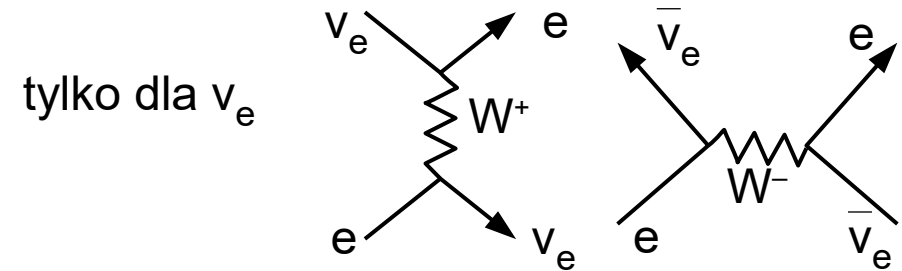
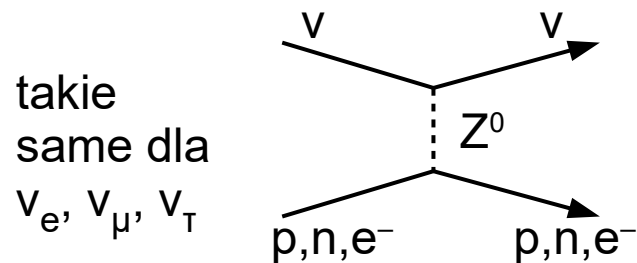
- **appearance:** bezpośrednia obserwacja zmiany zapachu

- możliwe kanały dla 3 zapachów:

- $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$: energie neutrin poniżej progu na produkcję naładowanych leptonów (słoneczne, reaktorowe)
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$: TRUDNE: wielka masa leptonu τ , małe ct , odkryty 2015
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$: mały efekt, odkryty 2013
- ν_τ : nie ma dobrych (intensywnych) źródeł ν_τ

Efekty materii – przykład dla neutrin słonecznych

- neutrina słoneczne są produkowane w gęstej materii słońca, a obecność elektronów wpływa na ich propagację



poziomy energetyczne propagujących stanów własnych są zmienione dla **składowej** ν_e (różne potencjały oddziaływań w kinetycznej części hamiltonianu)

- zmieniona masa efektywna: ν_e wzrasta, $\bar{\nu}_e$ maleje
- czułość na $\Delta m^2 \sim 10^{-5} \text{ eV}^2$, podczas gdy oscylacji w próżni na 10^{-10} eV^2
- rezonansowe wzmocnienie zachodzi dla określonych energii:

- zależność od gęstości elektronów i Δm^2
- dla Słońca przejście rezonansowe ok. 10 MeV

$$\sin^2 2\theta_m = \frac{\sin^2 2\theta}{\left(\frac{2\sqrt{2}G_F \cdot \rho E_\nu}{\Delta m^2} - \cos 2\theta \right)^2 + \sin^2 2\theta}$$

$$\Delta M^2 = \Delta m^2 \sqrt{\left(\frac{2\sqrt{2}G_F \cdot \rho E_\nu}{\Delta m^2} - \cos 2\theta \right)^2 + \sin^2 2\theta}$$

- efekty materii są czułe na hierarchię mas

Pojawianie się ν_e (appearance)

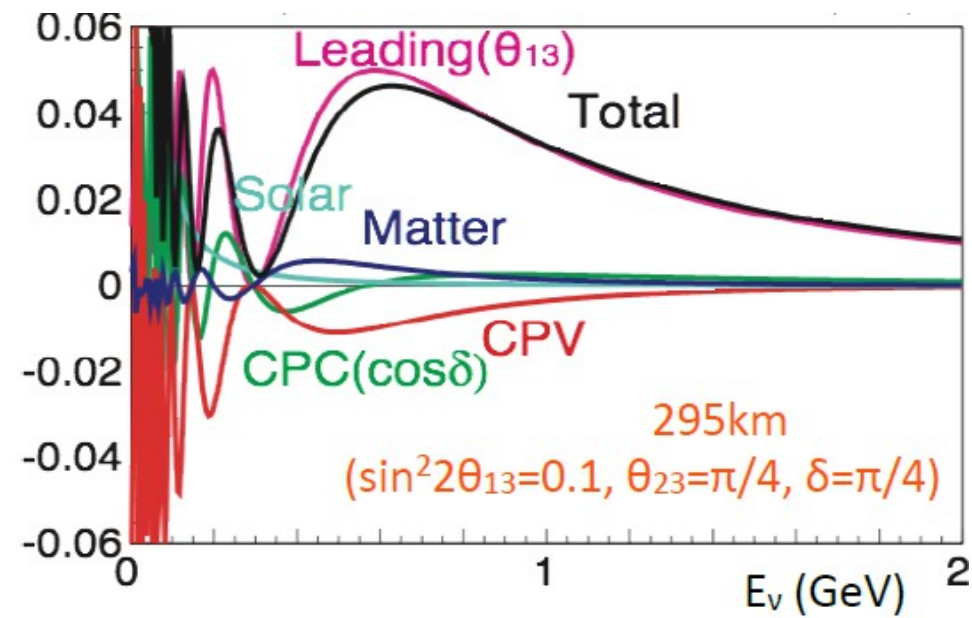
$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & 4 c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \sin^2 \Delta_{31} \quad \text{człon domujący} - \theta_{13} \\
 & + 8 c_{13}^2 s_{12} s_{13} s_{23} (c_{12} c_{23} \cos \delta_{CP} - s_{12} s_{13} s_{23}) \cos \Delta_{32} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{21} \\
 & - 8 c_{13}^2 c_{12} c_{23} s_{12} s_{13} s_{23} \sin \delta_{CP} \sin \Delta_{32} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{21} \quad \text{łamanie CP} \\
 & + 4 s_{12}^2 c_{13}^2 (c_{12}^2 c_{23}^2 + s_{12}^2 s_{23}^2 s_{13}^2 - 2 c_{12} c_{23} s_{12} s_{23} s_{13} \cos \delta_{CP}) \sin^2 \Delta_{21} \\
 & - 8 c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \frac{a L}{4 E_\nu} (1 - 2 s_{13}^2) \cos \Delta_{32} \sin \Delta_{31} + 8 c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \frac{a}{\Delta m_{31}^2} (1 - 2 s_{13}^2) \sin^2 \Delta_{31} \quad \text{efekty materii}
 \end{aligned}$$

for $\bar{\nu}$: $\delta_{CP} \rightarrow -\delta_{CP}$
 $a \rightarrow -a$

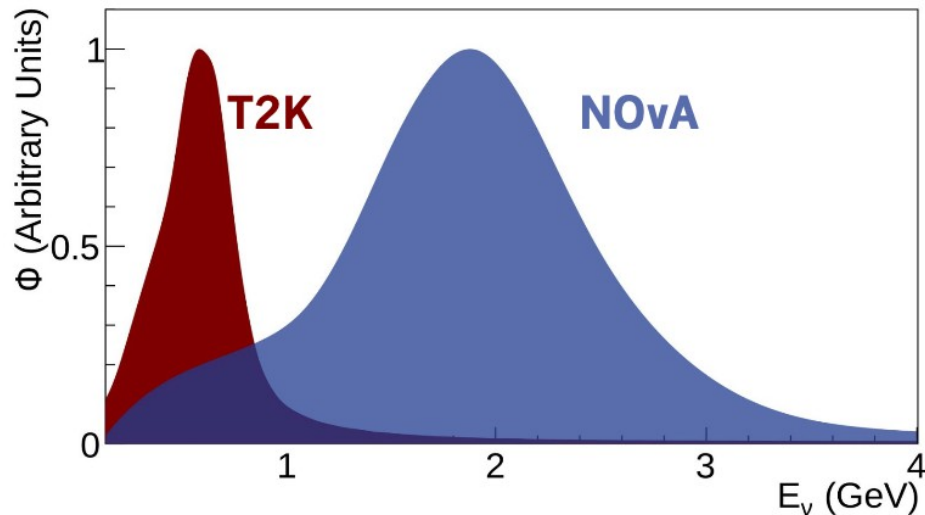
$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$, $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$
 $\Delta_{ij} = \Delta m_{ij}^2 L / 4 E_\nu$
 $a = 2\sqrt{2} G_F E_\nu n_e$

n_e związane z gęstością materii (obecność elektronów modyfikuje mieszanie)

- niezmiennik Jarlskog $\sim 0.033 \sin \delta_{CP}$
 (w sektorze kwarków 3×10^{-5})
- kanał czuły na oktant θ_{23}
- człon materii ma różny znak dla $\nu/\bar{\nu}$
 $\rightarrow$ czuły na hierarchię mas



T2K i NOvA



Rekonstrukcja energii neutrino:

T2K: wzór na rozpad dwuciałowy dla oddziaływań QE oraz rezonansowych
NOvA: kalorymetria

identyfikacja e/μ

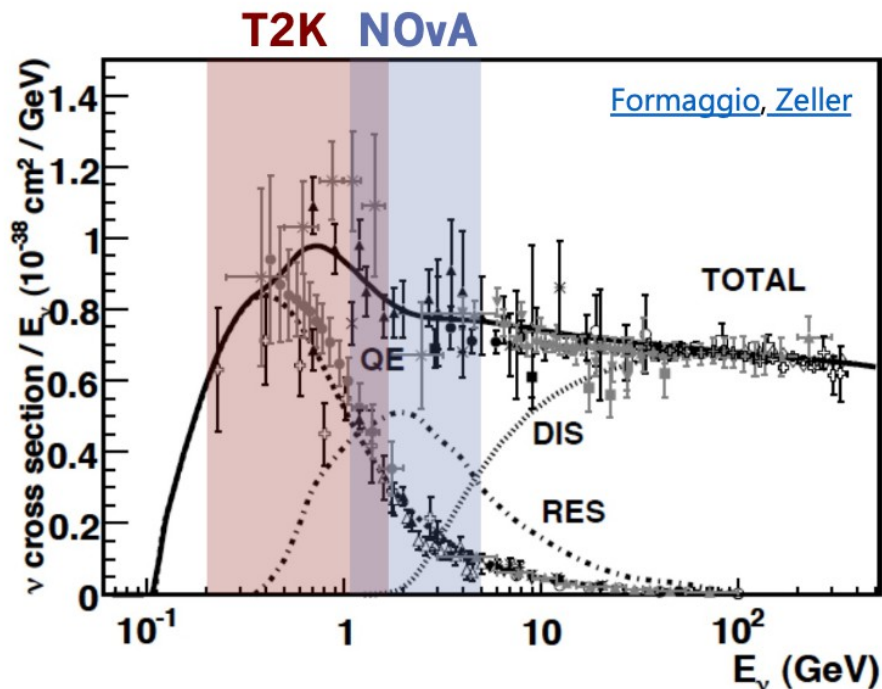
T2K: kształt pierścienia Czerenkowa

NOvA: konwolucyjna sieć neuronowa

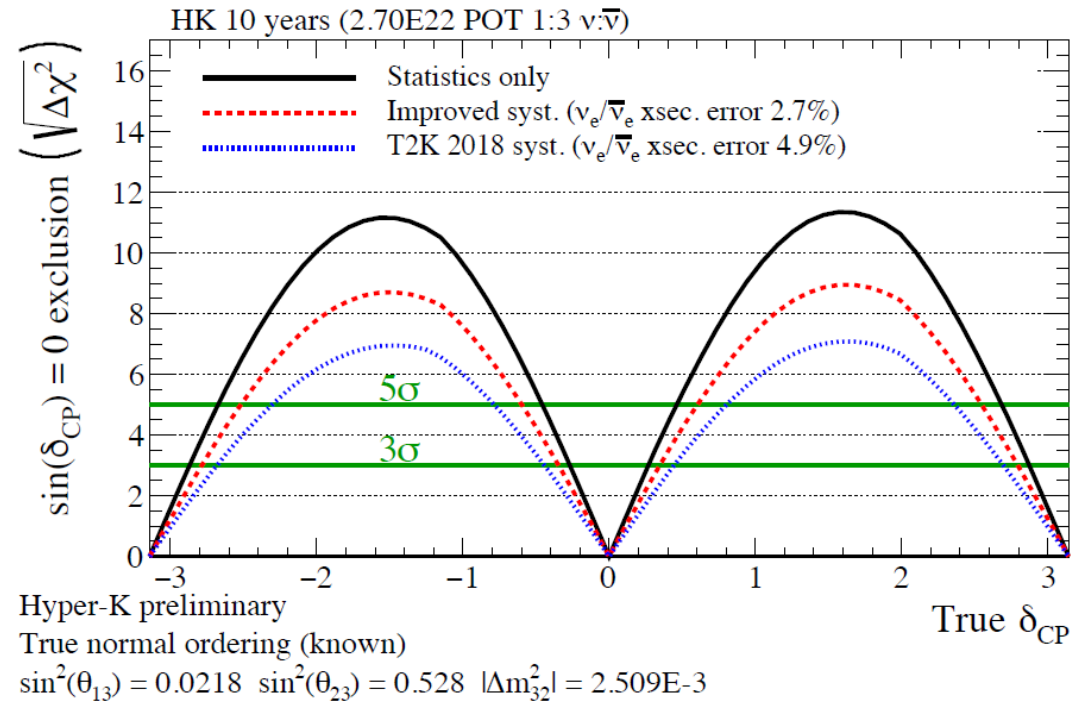
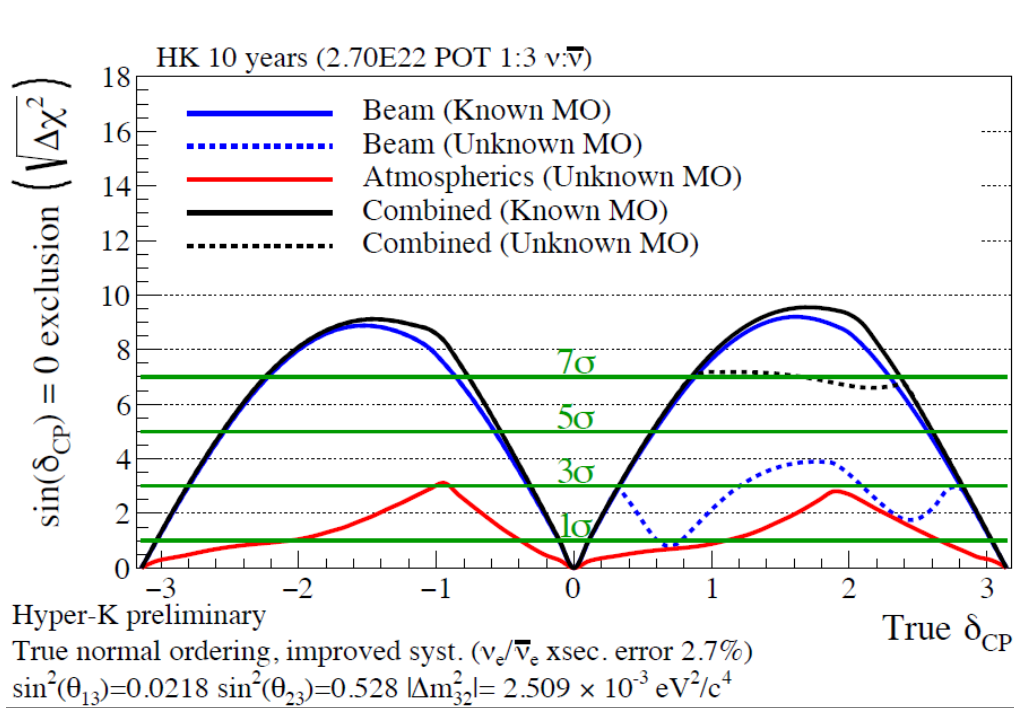
Liczby przypadków dla próbek (anty) ν_e (appearance)

T2K	DATA	Best fit total	$\delta_{CP}=0$	$\delta_{CP}=-\pi/2$
ν_e	94	96.47	83.56	99.06
ν_e CC1 π^+	14	10.47	9.45	10.85
anti- ν_e	16	17.34	19.35	17.02

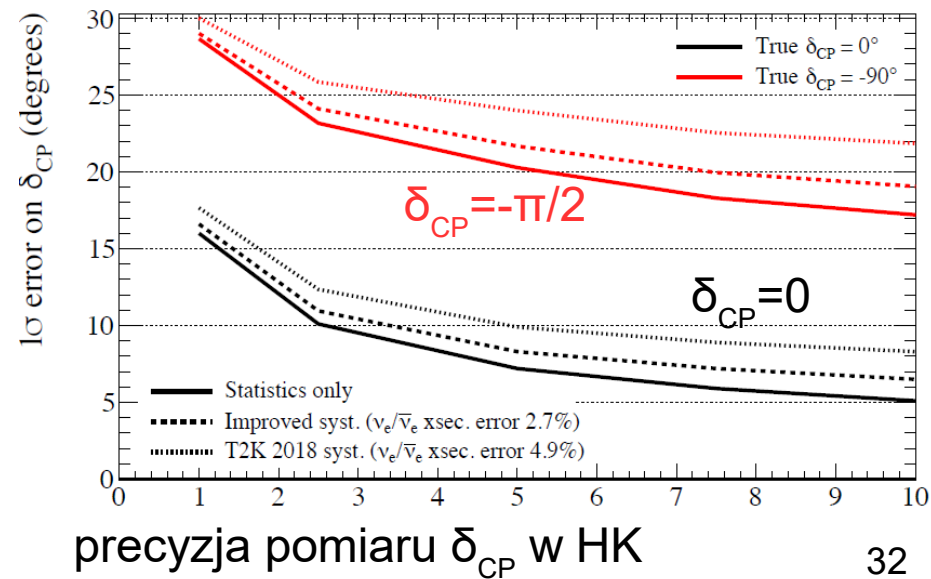
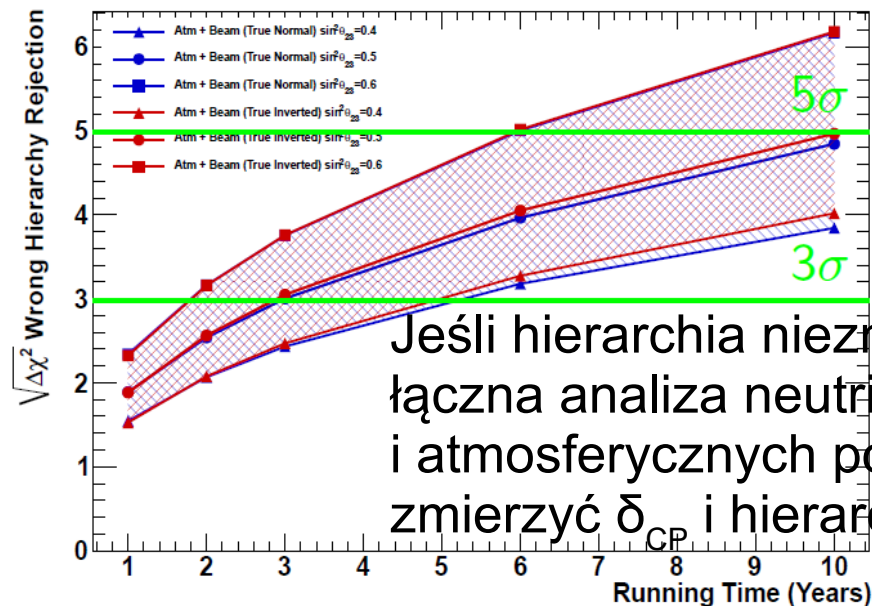
NOvA	Total observed	Best fit total	Signal	BKG
ν_e	82	85.8	59 ± 2.5	26.8 ± 1.7
anti- ν_e	33	33.2	19.2 ± 0.7	14.0 ± 1.0



Czułości Hyper-Kamiokande



Jeśli znana jest hierarchia mas, Hyper-K ma znakomitą czułość na łamanie CP

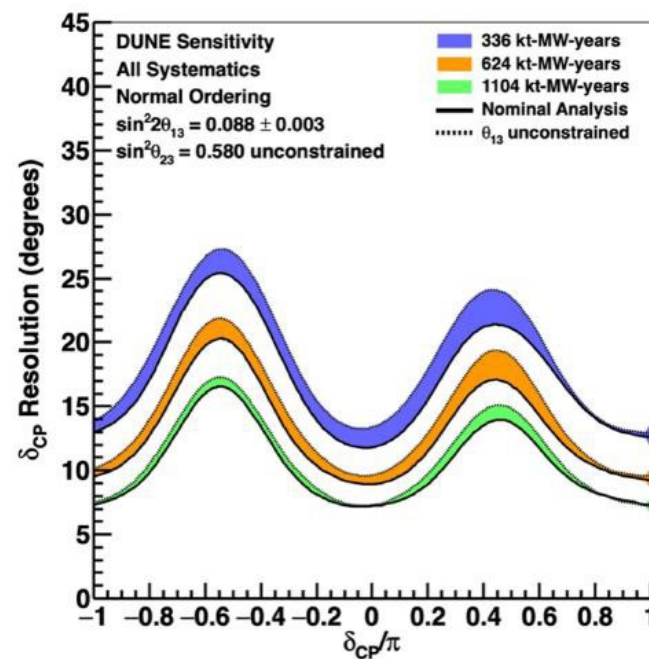
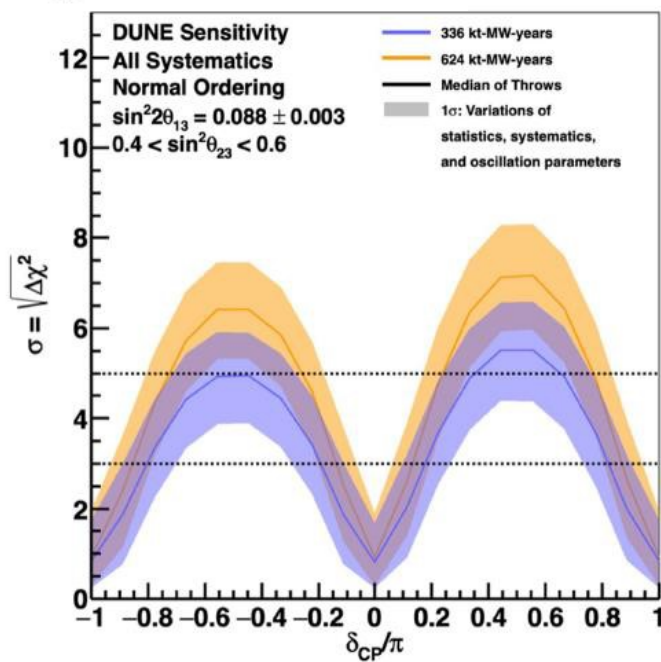
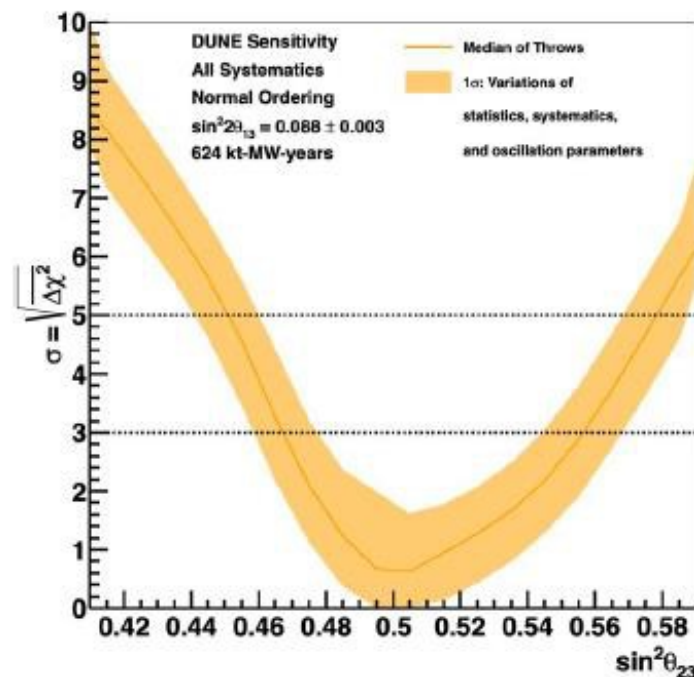
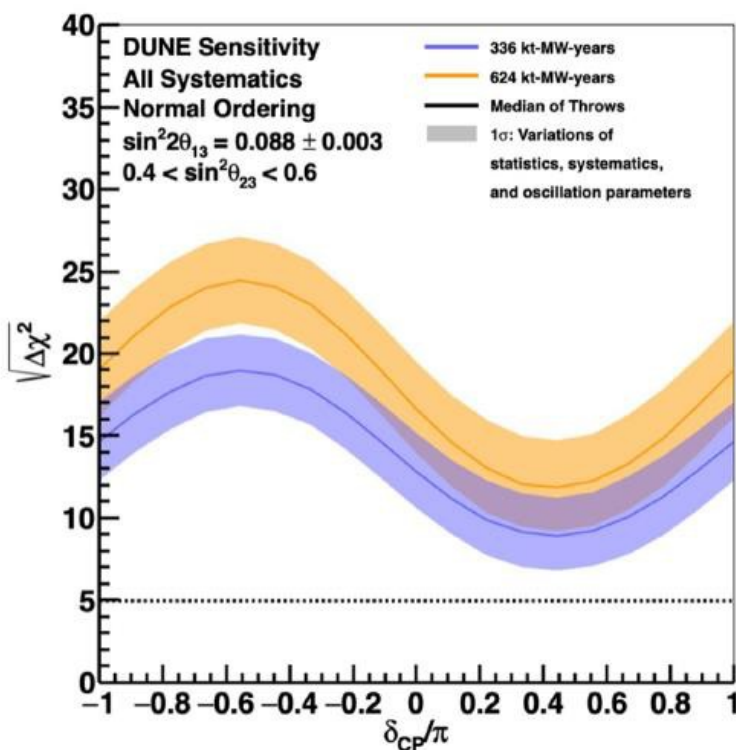


Mass Ordering

Czułości DUNE

określenie hierarchii mas na poziomie 5σ w < 2 lata dla dowolnej wartości δ_{CP}

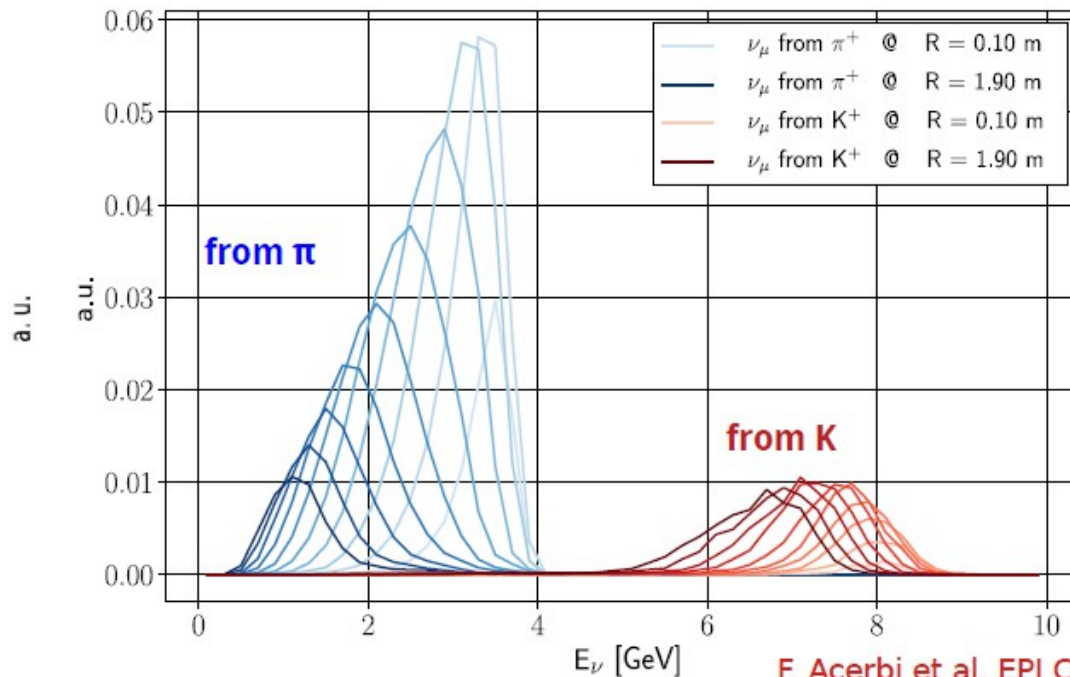
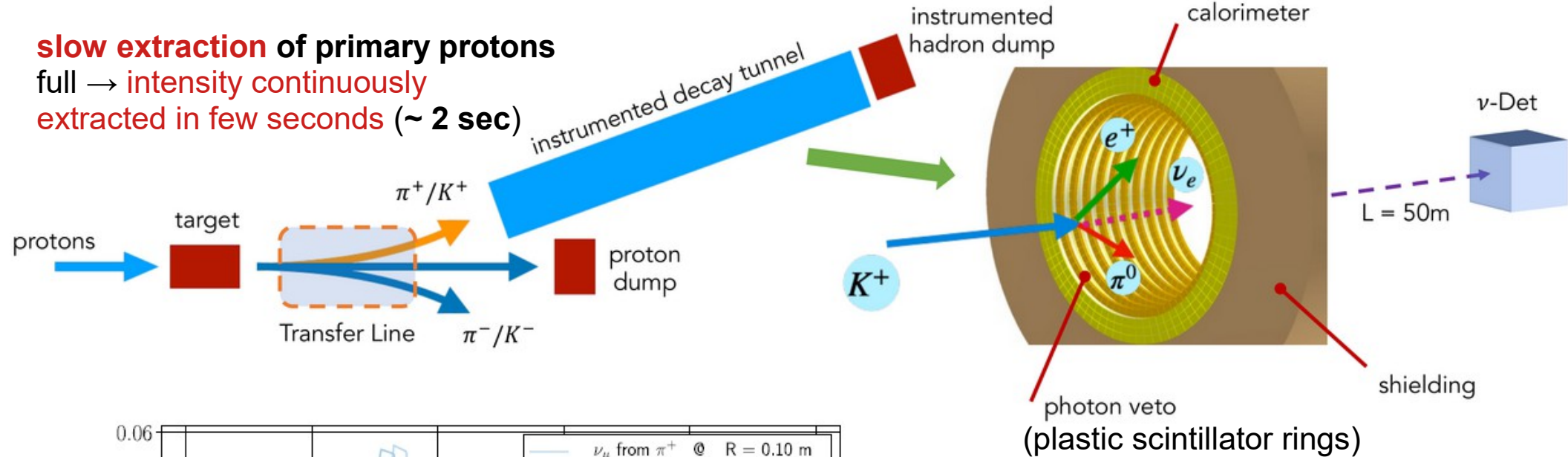
EPJ C 80 (2020) 978



ENUBET

slow extraction of primary protons

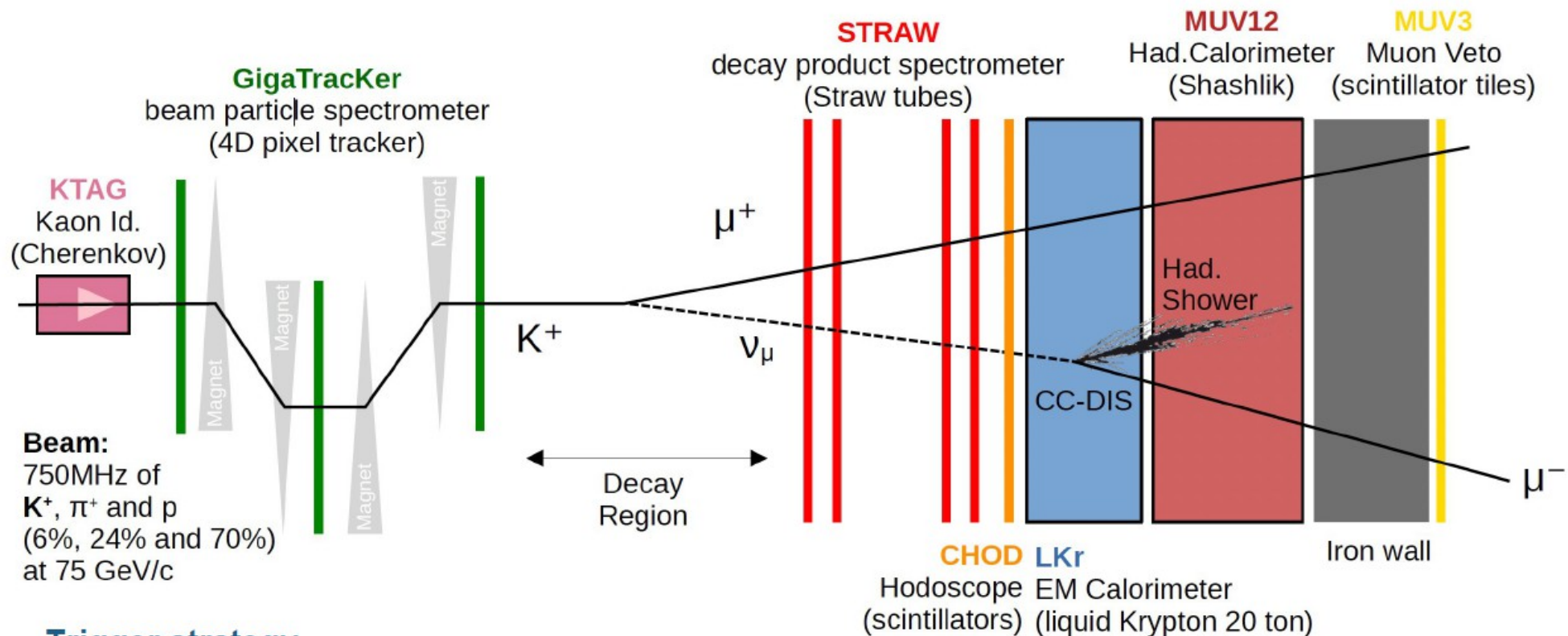
full → intensity continuously
extracted in few seconds (~ 2 sec)



F. Acerbi et al. EPJ C
83 (2023) 964

R = radial distance of interaction vertex
from beam axis

Proof of principle with NA62



Trigger strategy

- One charged particle in **CHOD**
- Energy deposit in the **LKr**
- Two charged particles in opposite quadrants of the **MUV3**

$$E_\nu = \frac{(1 - m_\mu^2/m_\pi^2)p_\pi}{1 + \gamma^2\theta_{\pi\nu}^2}$$

- One event observed in signal region with

$$E_\nu = E_{K^+} - E_{\mu^+} = 52.09\text{GeV} \quad \text{and} \quad \sigma_{E_{\text{nu}}}/E_{\text{nu}} = 0.34\%$$

- **First tagged neutrino candidate observed**

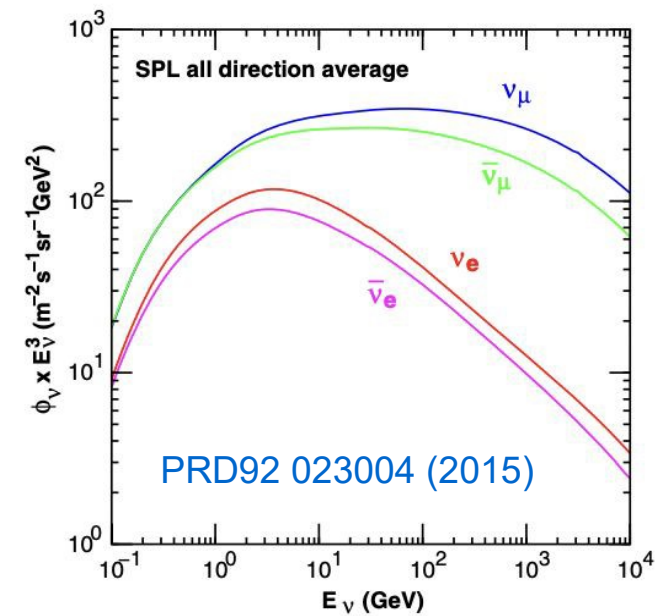
- prob. of observing one event in signal region: **19%**
- prob. of observing one background event: **3%**

M. Perrin-Terrin, EPS HEP 2025

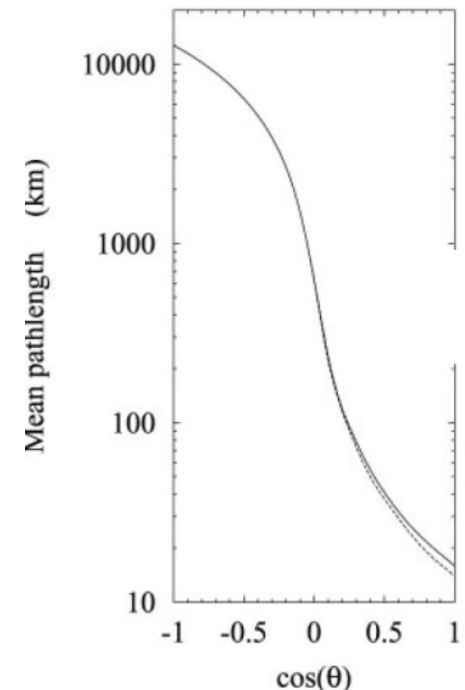
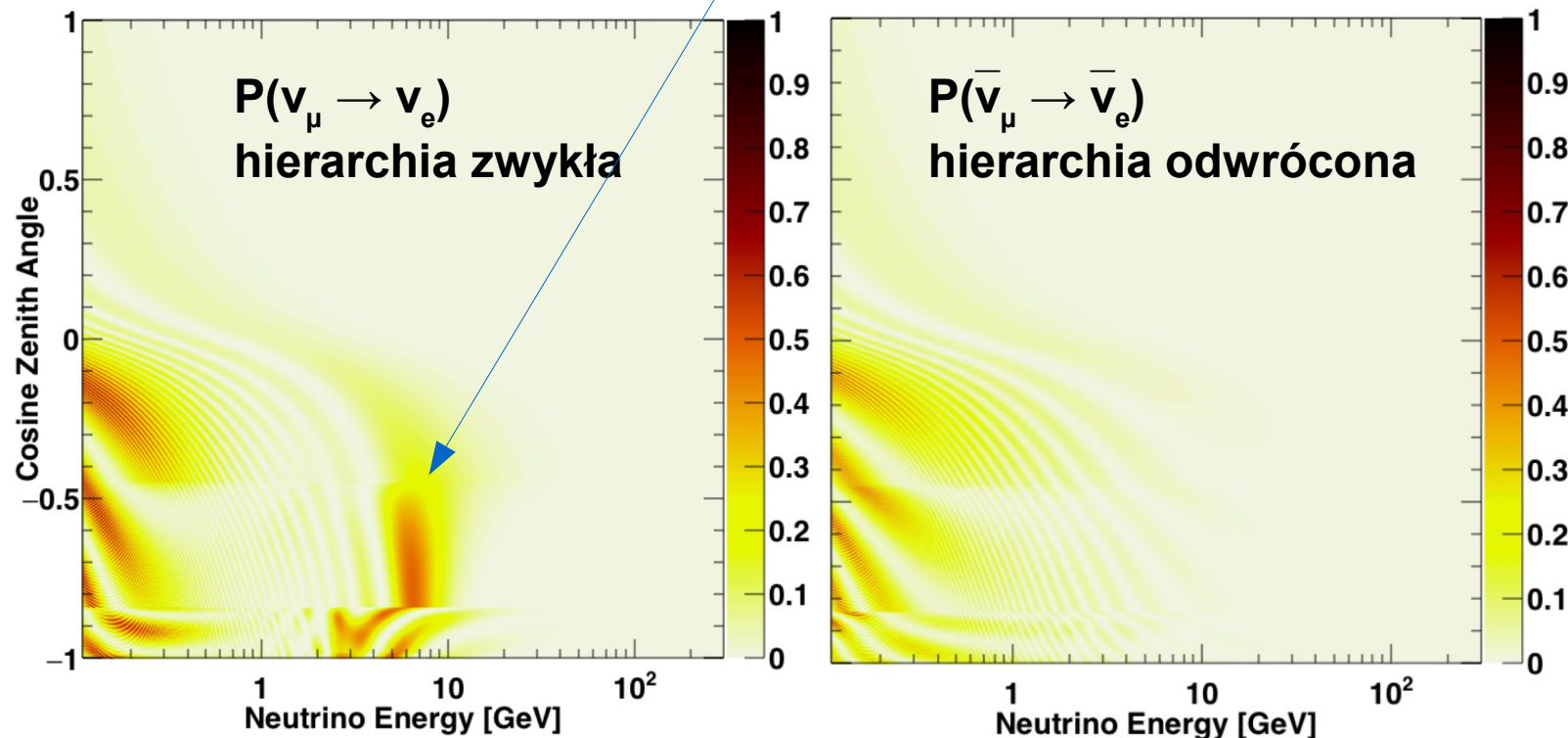
[PLB 863 (2025) 139345]

Neutrina atmosferyczne

- Szeroki zakres energii i dystansów
 - dystans określany na podstawie kąta
- Czułość na to θ_{23} , Δm^2_{32} , hierarchię mas
- Hierarchię mas można określić używając neutrino z zakresu **6-12 GeV** dzięki efektom materii w jądrze Ziemi
 - dla zwykłej (odwróconej) hierarchii oscylacje wzmocnione dla (anty)neutrino



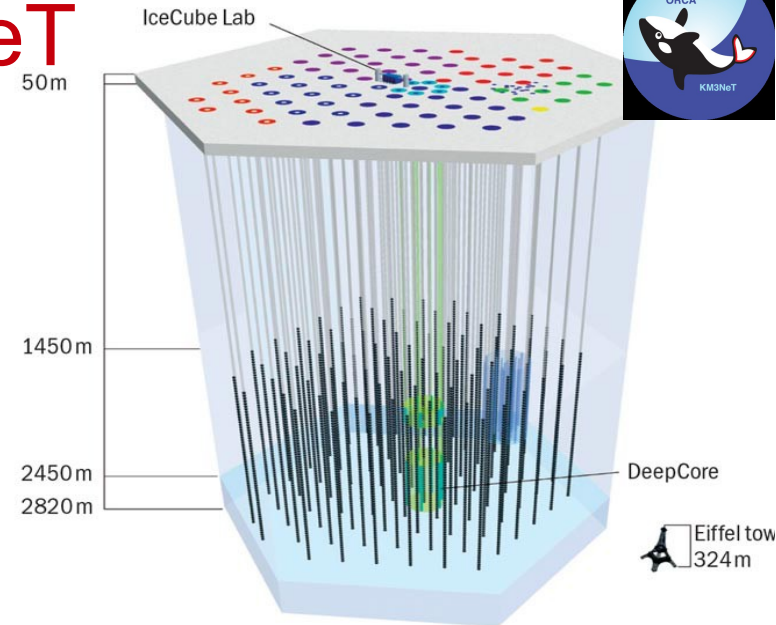
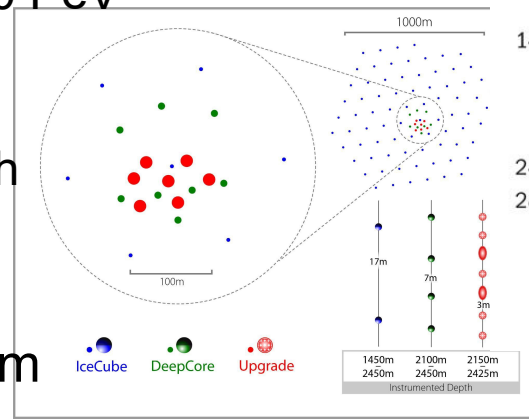
Atmospheric neutrinos travel
15 km to 13000 km.



IceCube i KM3NeT

- Ice Cube na biegunie pld.
 - 1km³ lodu jako detektor
 - zakres energii: ~100 GeV to ~10 PeV
 - DeepCore: gęściej obsadzony obszar może obserwować neutrino o GeV-owych energiach
 - plan dołożenia 7 lin
→ próg 1 GeV

- KM3NeT w Morzu Śródziemnym
 - ORCA: Oscillation Research from Cosmics in the Abyss - gęściej obsadzony obszar blisko Francji



zainstalowane: 18
plan: 115 lin
siatka 20 m
głębokość 2.5 km

