

Neutrina

R. Leitner

CZ-SK HEP Strategie 14.9.2018

Minulý update Evropské Strategie z roku 2013 praví o neutrinové fyzice toto:

High-priority large-scale scientific activities

....

f) Rapid progress in neutrino oscillation physics, with significant European involvement, has established a strong scientific case for a **long-baseline neutrino programme exploring CP violation and the mass hierarchy in the neutrino sector. CERN should develop a neutrino programme to pave the way for a substantial European role in future long-baseline experiments. Europe should explore the possibility of major participation in leading long-baseline neutrino projects in the US and Japan.**

....

Budu se soustředit na tyto priority

Other scientific activities essential to the particle physics programme

....

j) A range of important non-accelerator experiments take place at the overlap of particle and astroparticle physics, such as **searches for proton decay, neutrinoless double beta decay** and dark matter, and **the study of high-energy cosmic-rays.**

These experiments address fundamental questions beyond the Standard Model of particle physics. The exchange of information between CERN and ApPEC has progressed since 2006. In the coming years, CERN should seek a closer collaboration with ApPEC on detector R&D with a view to maintaining the community's capability for unique projects in this field.

....

Hlavní otázky současné neutrinové fyziky

- 1. Narušení CP v oscilacích neutrin** – s tím jak uvidíme souvisí dílčí otázky, zejména velikost úhlu θ_{13} , pořadí (hierarchie) hmot, je úhel θ_{23} větší anebo menší než 45 stupňů
2. Narušení leptonového čísla – jsou neutrina Dirakovské nebo Majoranovské částice, existuje bezneutrinový dvojný rozpad?
3. Co víme o velikosti hmot neutrin?
4. Existují další druhy neutrin?

Neutrino mixing - 3 flavors x 3 mass case:

Canonical representation of Pontecorvo-Magi-Nakagawa-Sakata mixing matrix is done by ordered product of 12, 13 and 23 rotations, one CP violating phase δ connected to the smallest mixing angle θ_{13} and two Majorana phases $\alpha_{1,2}$.

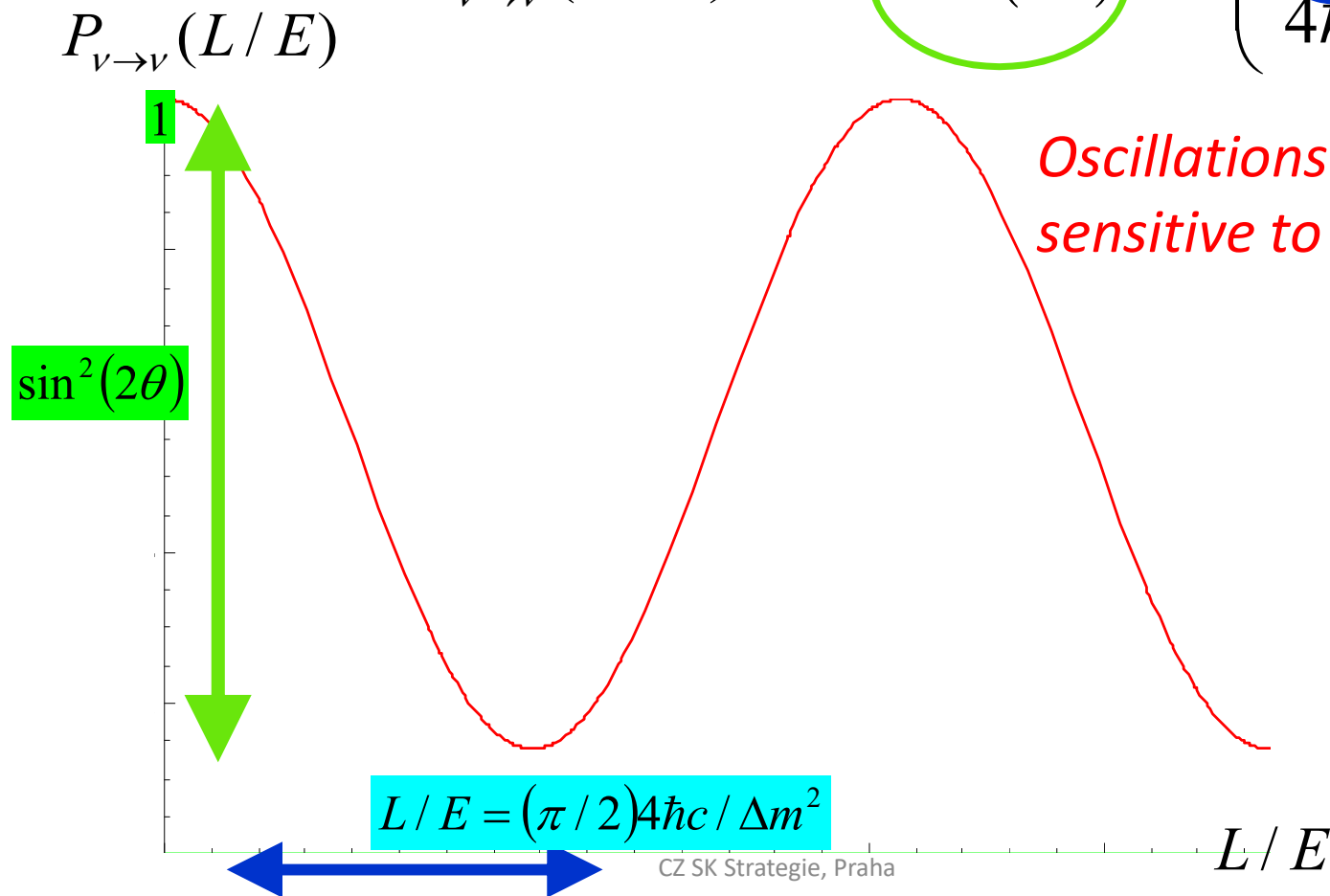
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_{23}) & \sin(\theta_{23}) \\ 0 & -\sin(\theta_{23}) & \cos(\theta_{23}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\theta_{13}) & 0 & \sin(\theta_{13}) \cdot e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_{13}) \cdot e^{i\delta} & 0 & \cos(\theta_{13}) \end{pmatrix}.$$

$$\begin{pmatrix} \cos(\theta_{12}) & \sin(\theta_{12}) & 0 \\ -\sin(\theta_{12}) & \cos(\theta_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

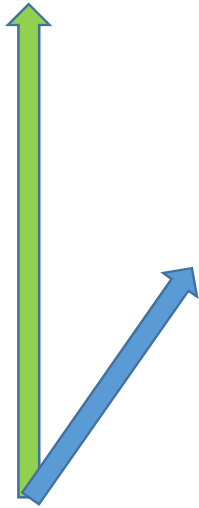
Majorana phases α are irrelevant for oscillations. They are non zero if neutrinos are equal to anti-neutrinos (Majorana neutrinos).

2x2 Mixing **Amplitude of oscillations = $\sin^2(2\theta)$** ,
oscillation length is inversely proportional to Δm^2

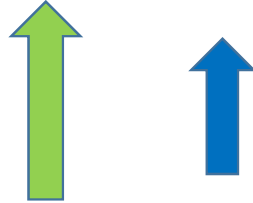
$$P_{\nu \rightarrow \nu}(L/E) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4\hbar c E}\right)$$



$$\Delta m_{21}^2 > 0$$

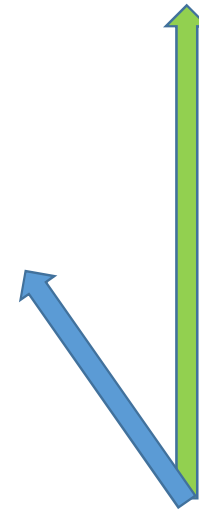


$$A_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = |U_{e1}^2| + |U_{e2}^2| e^{-i \frac{\Delta m_{21}^2 L}{2\hbar c E}}$$



$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = \left(|U_{e1}^2| + |U_{e2}^2| e^{-i \frac{\Delta m_{21}^2 L}{2\hbar c E}} \right) \left(|U_{e1}^2| + |U_{e2}^2| e^{+i \frac{\Delta m_{21}^2 L}{2\hbar c E}} \right)$$

$$\Delta m_{21}^2 < 0$$

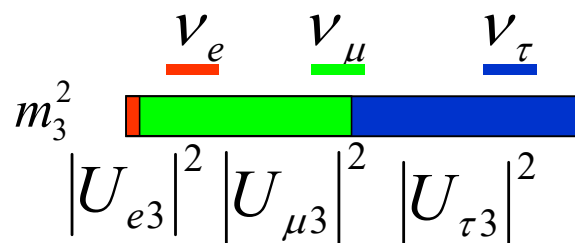


Pro dvě amplitudy je výsledná pravděpodobnost stejná pro otáčení ve směru i proti směru hodinových ručiček

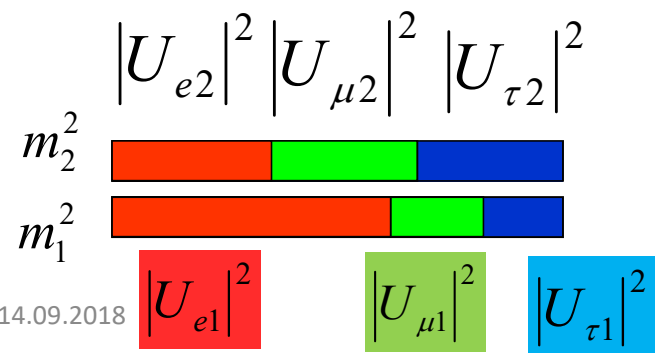
OSCILLATION PARAMETERS – MASS differences

From Solar neutrino experiments we know that m_2 (mass state with 1/3 of ν_e) is heavier than m_1 (1/3 of ν_e), we do not know if m_3 is the lightest or the heaviest neutrino mass eigenstate

Two mass splits differ by a factor of app 30



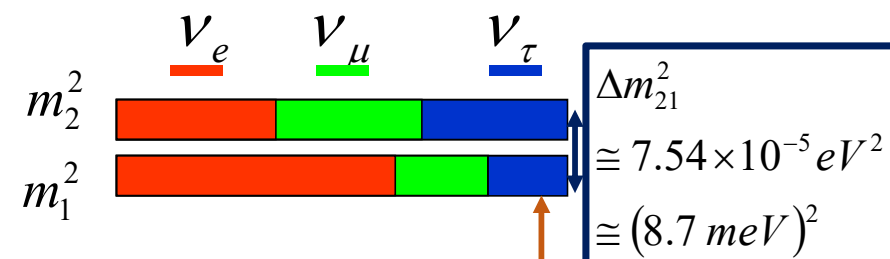
NORMAL MASS ORDERING (NO), HIERARCHY (NH)



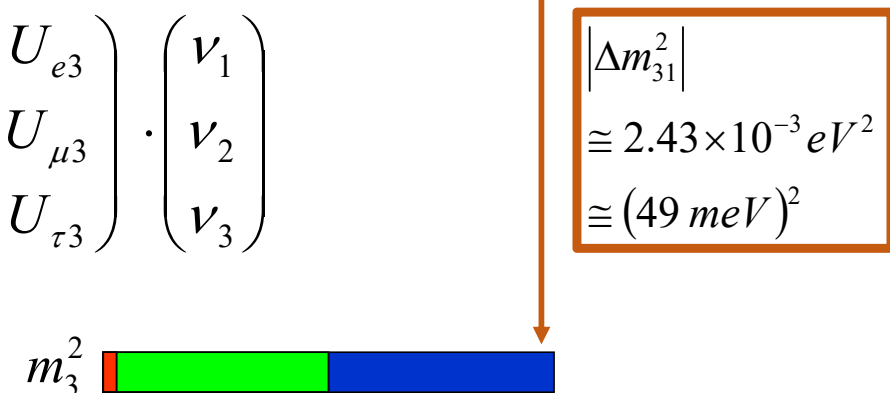
14.09.2018

$$\begin{pmatrix} \bar{\nu}_e \\ \bar{\nu}_\mu \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

CZ SK Strategie, Praha



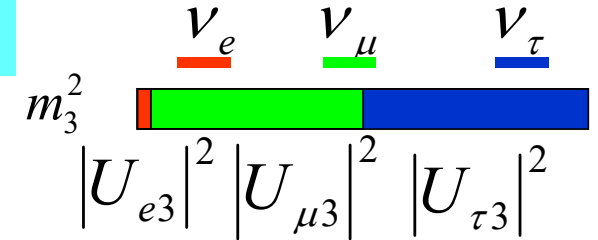
INVERSE MASS ORDERING (IO) (IH)



OSCILLATION PARAMETERS – mixing angles

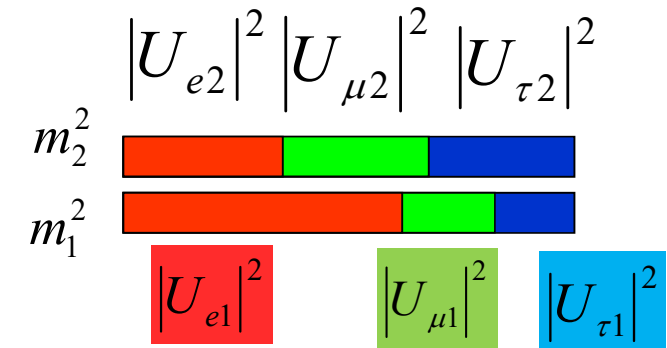
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \theta_{23} \cong 45^\circ & 0 \\ 0 & \cos(\theta_{23}) & \sin(\theta_{23}) & \\ 0 & -\sin(\theta_{23}) & \cos(\theta_{23}) & \end{pmatrix} \cdot$$

Half of both muon and tauon neutrinos in m_3



$$\begin{pmatrix} \cos(\theta_{13}) & 0 & \sin(\theta_{13}) \cdot e^{-i\delta} \\ 0 & \theta_{13} \cong 8.5^\circ & 0 \\ -\sin(\theta_{13}) \cdot e^{i\delta} & 0 & \cos(\theta_{13}) \end{pmatrix} \cdot$$

Very small fraction of electron neutrinos in m_3



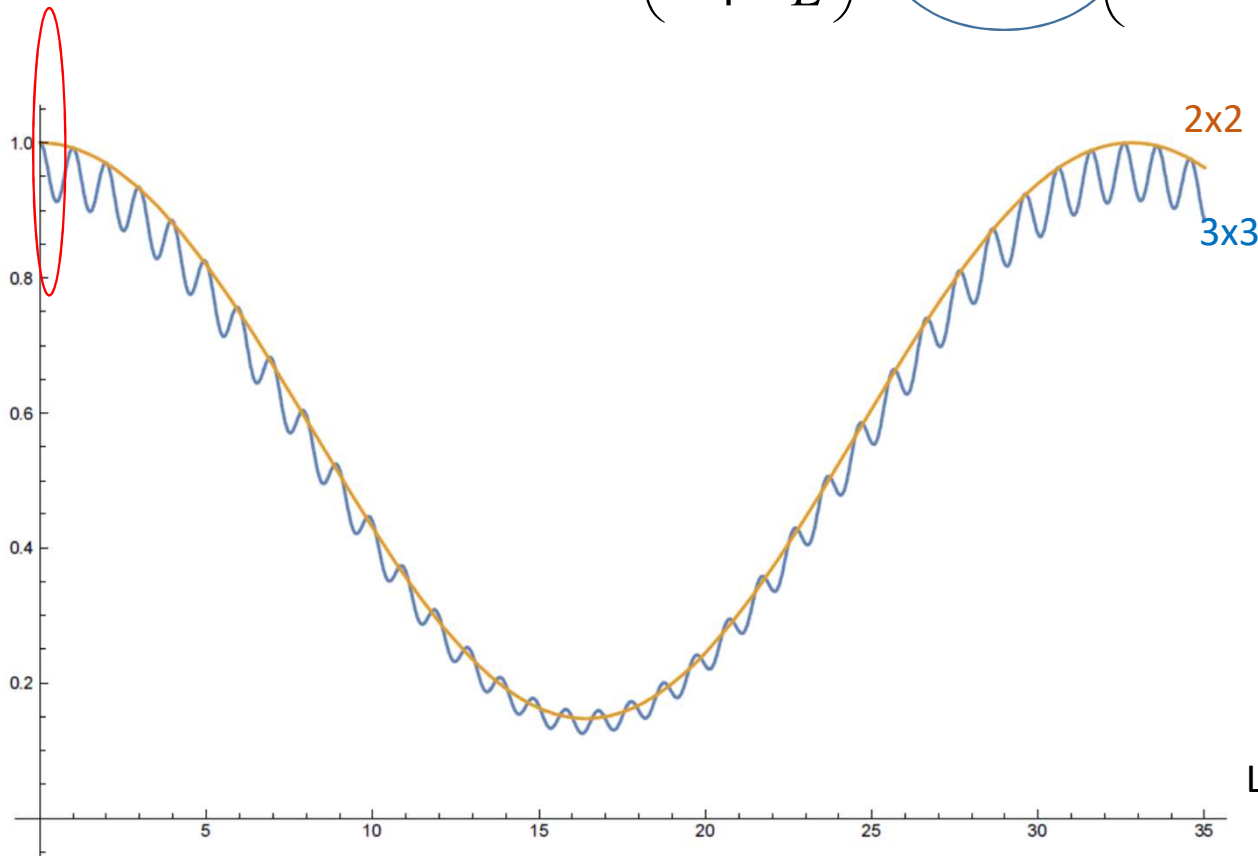
$$\begin{pmatrix} \cos(\theta_{12}) & \sin(\theta_{12}) & 0 \\ -\sin(\theta_{12}) & \cos(\theta_{12}) & 0 \\ 0 & \theta_{12} \cong 34^\circ & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

2/3 of electron neutrinos in m_1 and 1/3 in m_2

**Disappearance probability of electron neutrinos
for 2x2 and 3x3 case**

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}^{2 \times 2} = 1 - \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4 E}\right)$$

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}^{3 \times 3} = 1 - \cos^4(\theta_{13}) \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4 E}\right) - \sin^2(2\theta_{13}) \left(\cos^2(\theta_{12}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4 E}\right) + \sin^2(\theta_{12}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4 E}\right) \right)$$

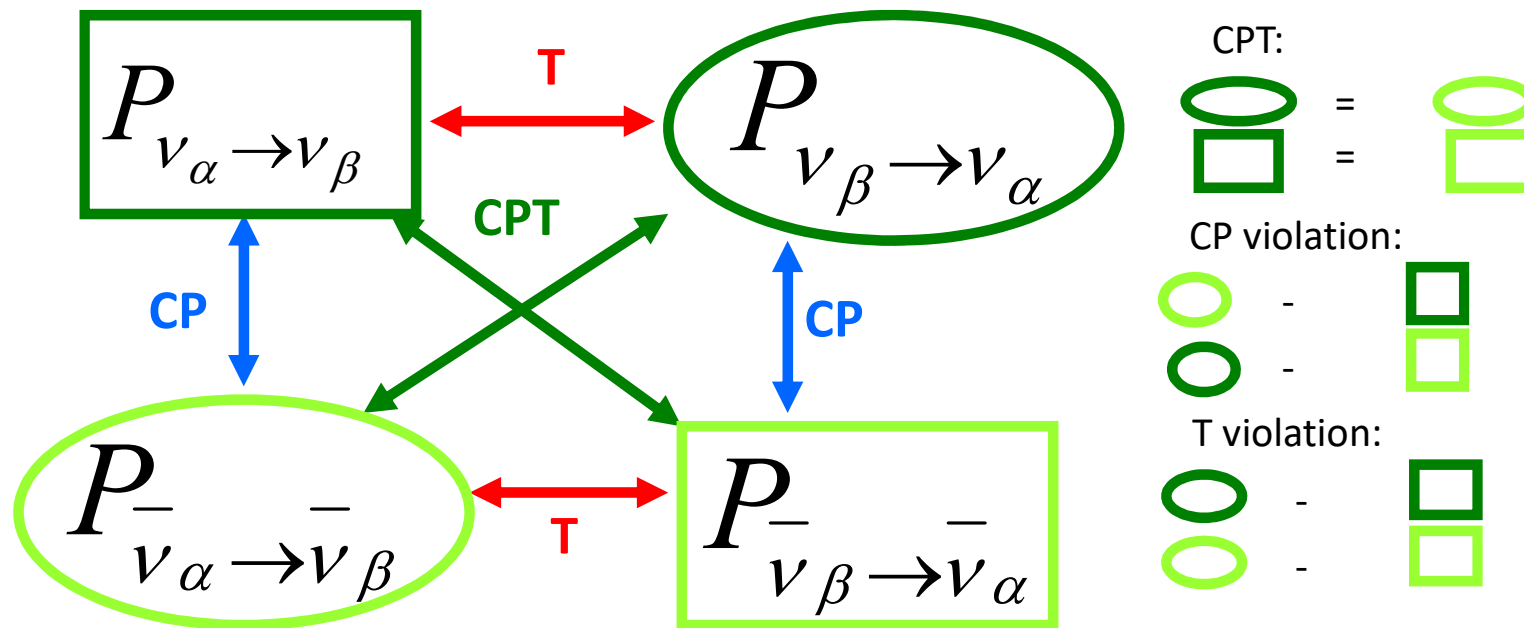


$$\sin^2\left(\frac{\Delta m_{ee}^2 L}{4 E}\right)$$

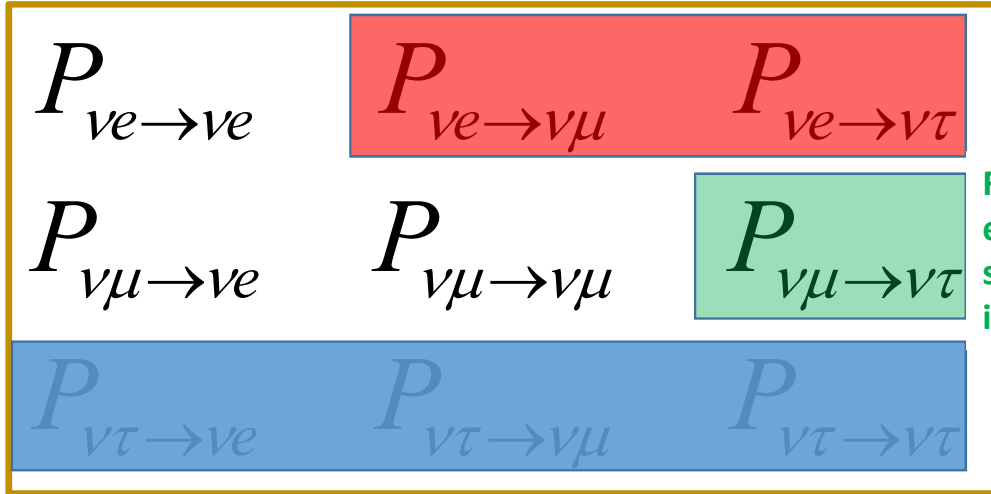
Hlavní otázky současné neutrinové fyziky

1. **Narušení CP v oscilacích neutrin** – s tím jak uvidíme souvisí dílčí otázky, zejména velikost úhlu θ_{13} , pořadí (hierarchie) hmot, je úhel θ_{23} větší anebo menší než 45 stupňů

CP and **T** violation in lepton sector can be investigated with neutrino oscillations

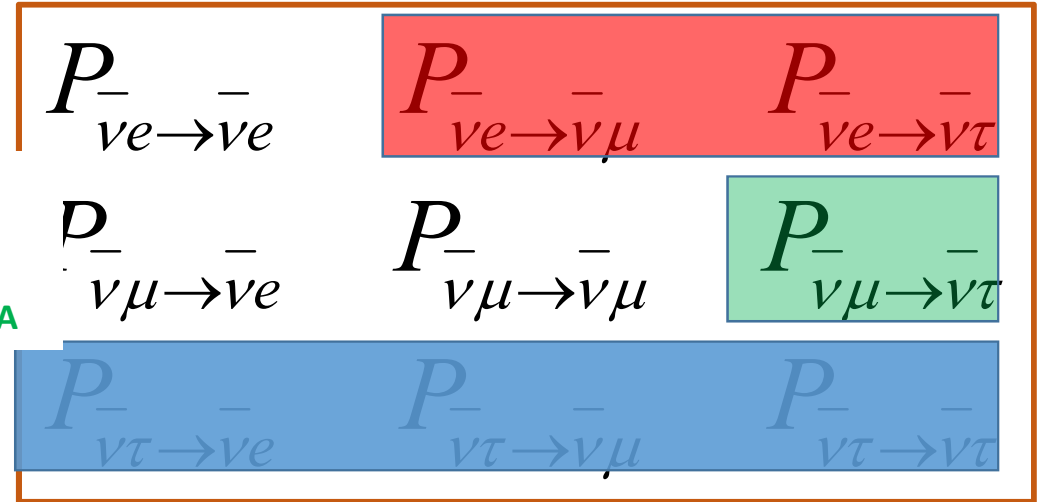


Currently there are no high energy electron neutrinos available



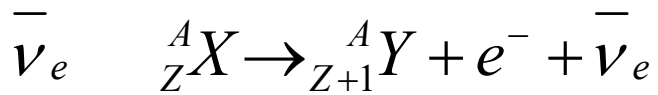
No tau neutrino sources

Few events seen in OPERA



To investigate CP violation one can measure the difference

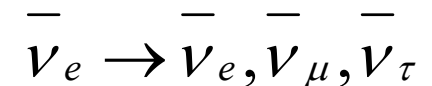
$$P_{\nu \mu \rightarrow \nu e} - P_{\bar{\nu} \mu \rightarrow \bar{\nu} e}$$



Zdroj antineutrin (např. reaktor)

Jaké oscilační experimenty můžeme dělat s elektronovými (anti)neutriny

Po cestě k detektoru elektronová antineutrína oscilují na ostatní typy

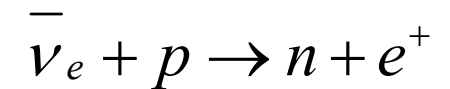


Můžeme proto měřit pouze **mizení a znovuobjevení elektronových antineutrin**. Tento typ experimentů nazýváme **DISAPPEARANCE EXPERIMENT**

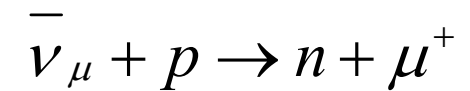
Dnes nemáme dostatečně intenzivní zdroje elektronových neutrin ani antineutrin s energiemi vyššími než ~ 10 MeV

V detektoru můžeme rozpoznat typ antineutrína

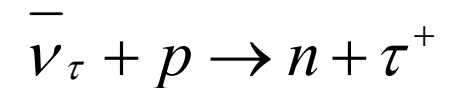
$$E_\nu > 1.8 \text{ MeV}$$

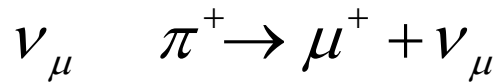


$$E_\nu > \approx 100 \text{ MeV}$$



$$E_\nu > 3500 \text{ MeV}$$





Zdroj mionových neutrin
(urychlovače)

Jaké oscilační experimenty můžeme dělat s mionovými (anti)neutriny

Po cestě k mionová neutrina oscilují na ostatní typy

$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}, \nu_e, \nu_{\tau}$$

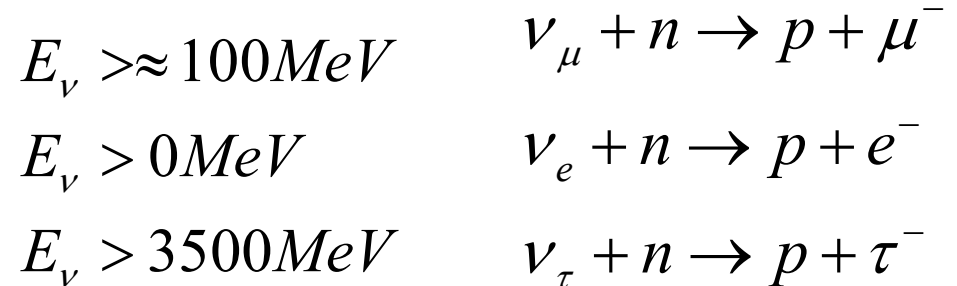
Můžeme proto měřit nejen mizení a znovuobjevení mionových (anti)neutrin.

DISAPPEARANCE EXPERIMENT

Ale také objevení neutrin elektronových a pokud mají dostatečnou energii, tak také tauonových neutrin

APPEARANCE EXPERIMENT

V detektoru můžu rozpoznat typ antineutrina



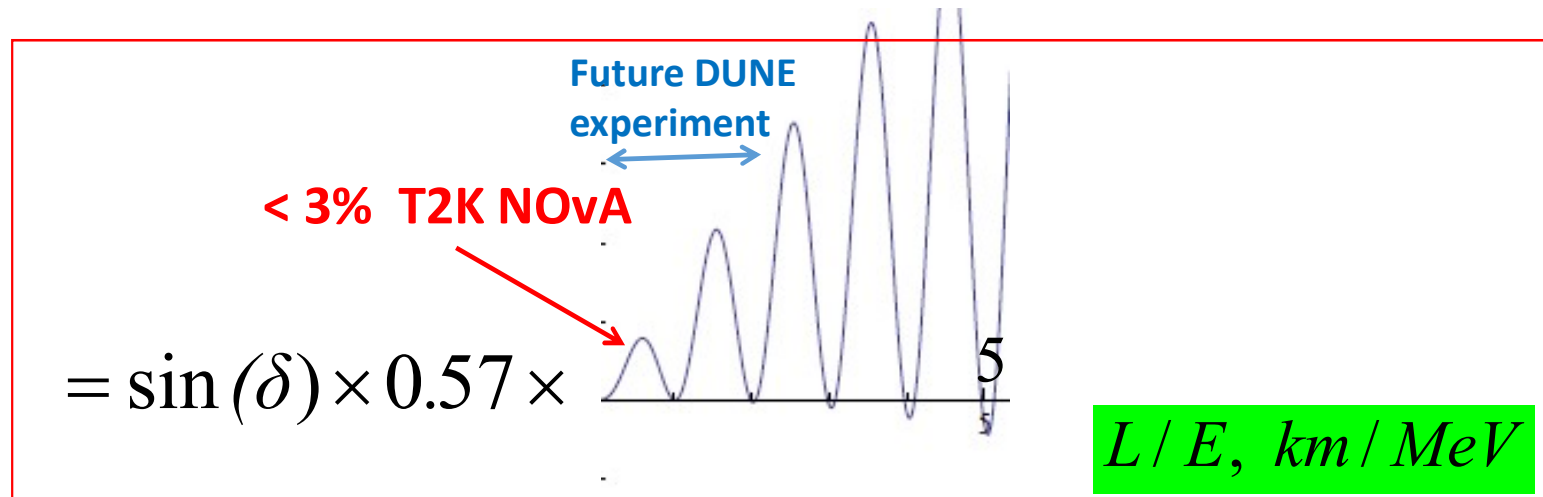
$$P_{\nu\mu \rightarrow \nu e} - (L/E) - P_{\nu\mu \rightarrow \nu e}(L/E) =$$

$$2 \sin(\delta) \cdot 0.95 \cdot 0.30 \cdot 0.93 \cdot 1.00 = 0.57 \sin(\delta)$$

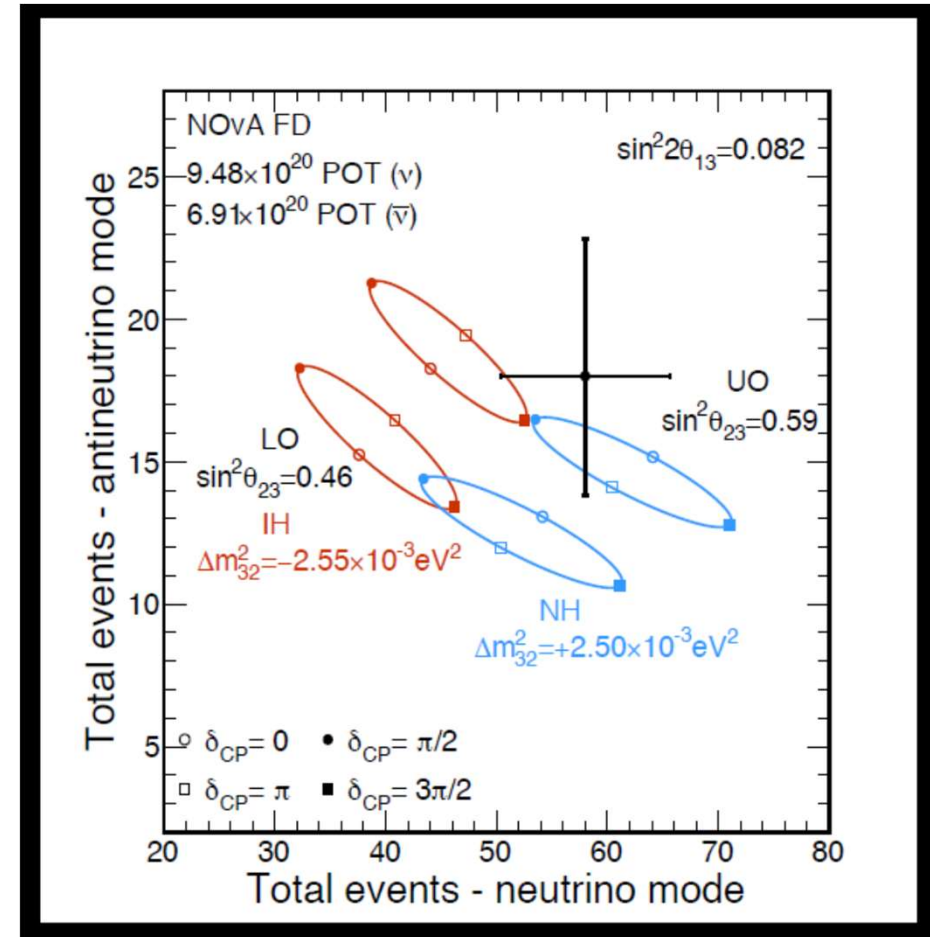
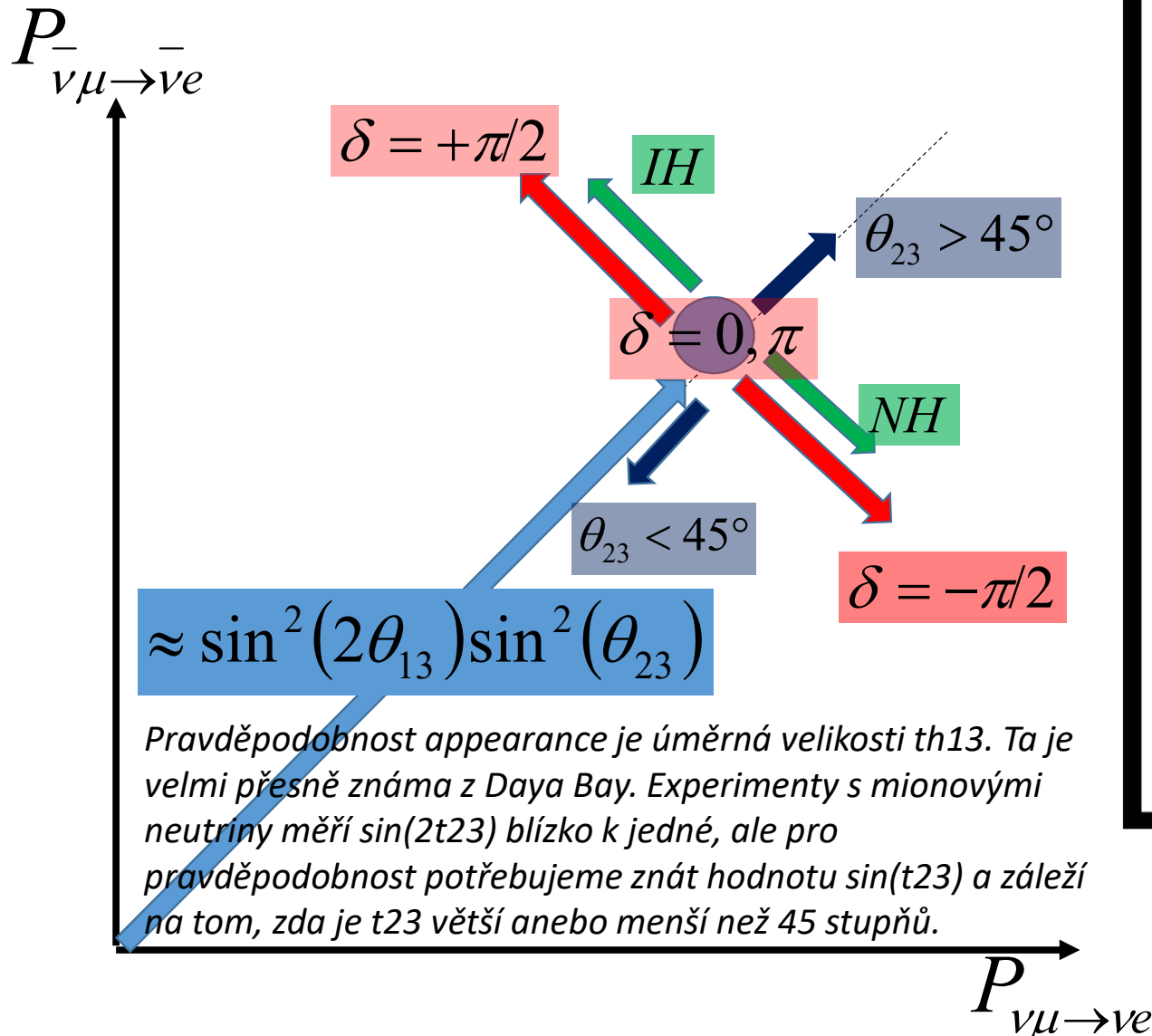
$$2 \sin(\delta) \cos(\theta_{13}) \sin(2\theta_{13}) \sin(2\theta_{12}) \sin(2\theta_{23})$$

$$\times \sin\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4\hbar c E}\right) \sin\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4\hbar c E}\right) \sin\left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4\hbar c E}\right)$$

CP narušení je možné jen pokud jsou všechny tři směšovací úhly nenulové a všechny tři hmotové stavy různé



Výsledek NOvA z Neutrino 2018

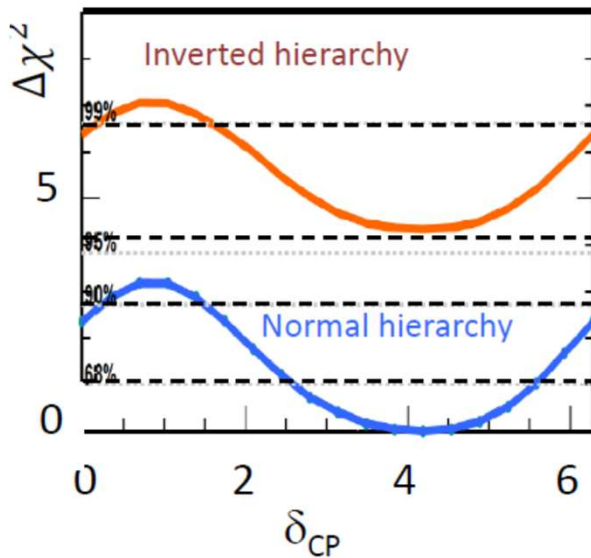


Všechny neurčitosti (hmotová hierarchie, θ_{23} vs 45 stupňů, velikost CP fáze delta) nevyřeší jeden experiment, je třeba nezávislých metod pro určení zejména hmotové hierarchie.

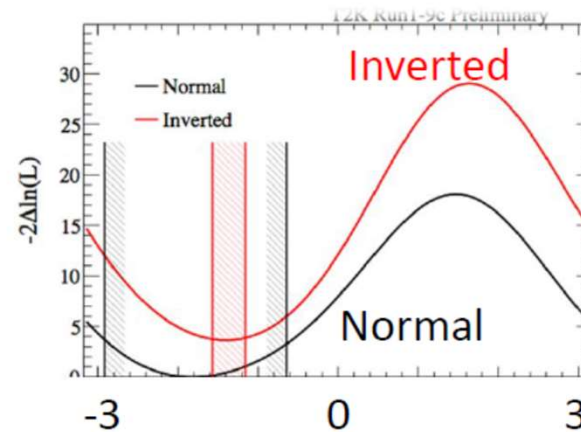
T. Kajita, Experimental Outlook at Neutrino 2018

News in Neutrino 2018

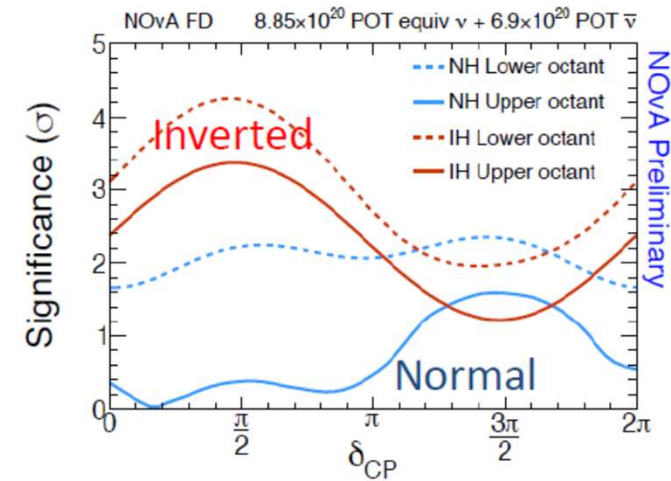
Super-K atmospheric (Y. Hayato)



T2K (M. Wascko)



NOvA (M. Sanchez)



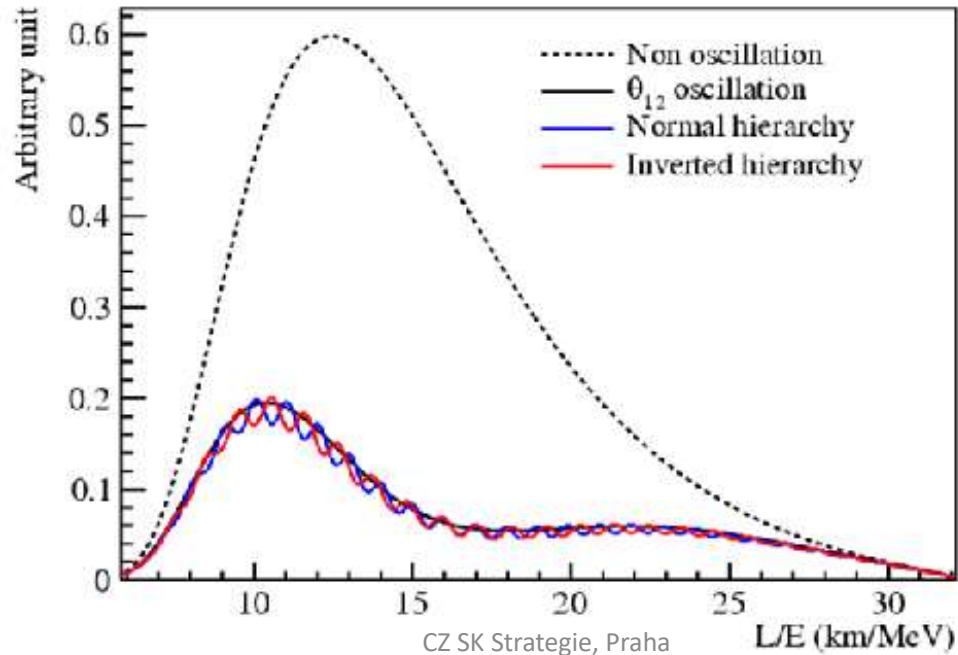
Already some interesting indications:

- ➔ **NO favored by these 3 experiments at $\sim(1 \sim 2)$ sigma level each.**
- ➔ **These experiments give some favored δ_{CP} region(s).**

Měření hierarchie v experimentu JUNO

$$A_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = |U_{e1}^2| + |U_{e2}^2| e^{-i \frac{\Delta m_{21}^2 L}{2\hbar c E}} + |U_{e3}^2| e^{-i \frac{\Delta m_{31}^2 L}{2\hbar c E}}$$

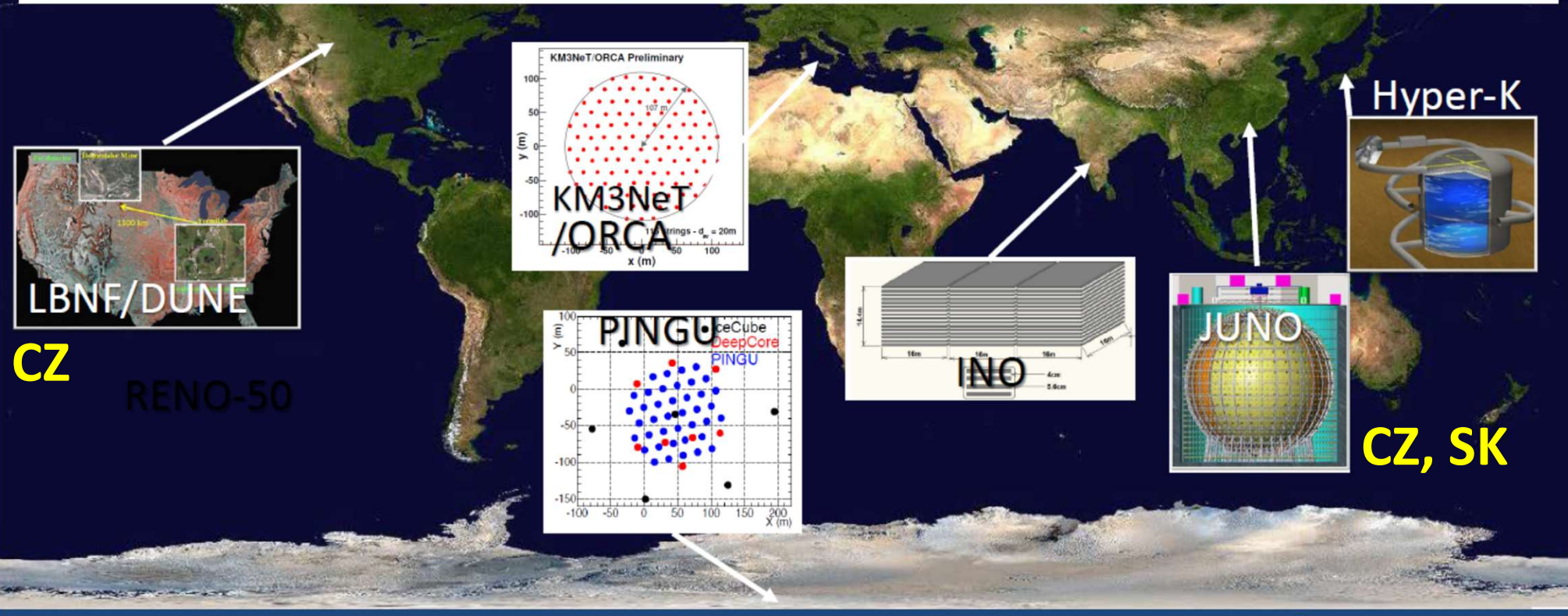
Pro tři amplitudy závisí výsledná pravděpodobnost na tom, zda se nejmenší amplituda otáčí ve směru anebo proti směru hodinových ručiček, tj. na znaménku Δm_{31}^2 .



To je podstatou měření hierarchie hmot v experimentu JUNO. Vyžaduje přesnou energetickou kalibraci a skvělé energetické rozlišení.

Future experiments that will tell us the neutrino masses hierarchy

We would like to be convinced the neutrino mass ordering by consistent results from several different technologies/methods with $> 3 \sigma$ CL from each exp.

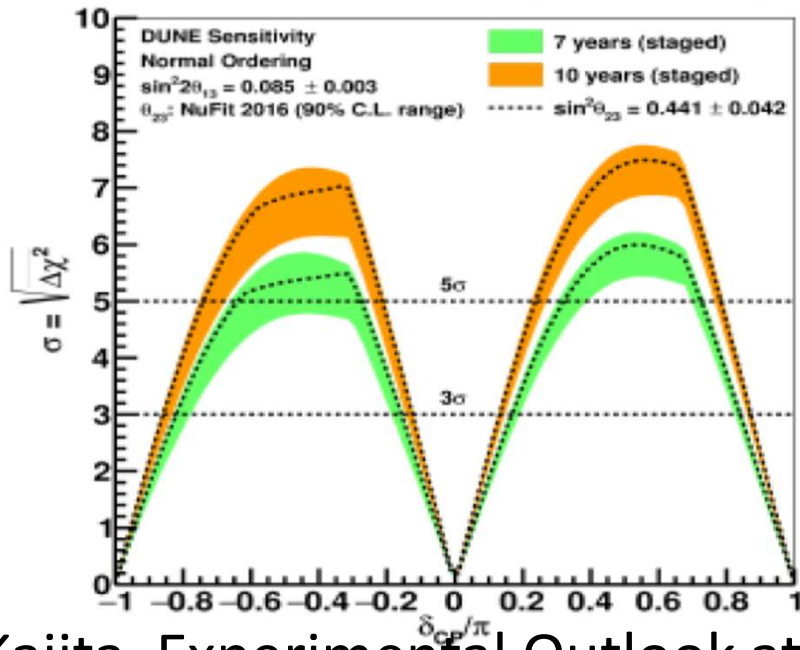


Definitivní měření CP fáze delta bude možné pravděpodobně až v budoucích experimentech DUNE a Hyper-K

Sensitivities

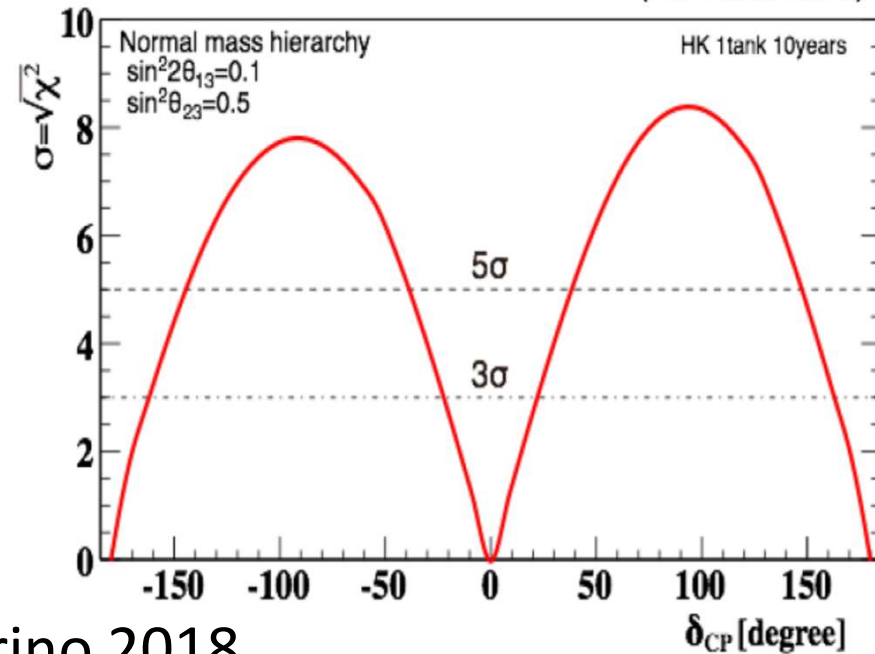
DUNE

(E. Worcester)



Hyper-K

(M. Shiozawa)



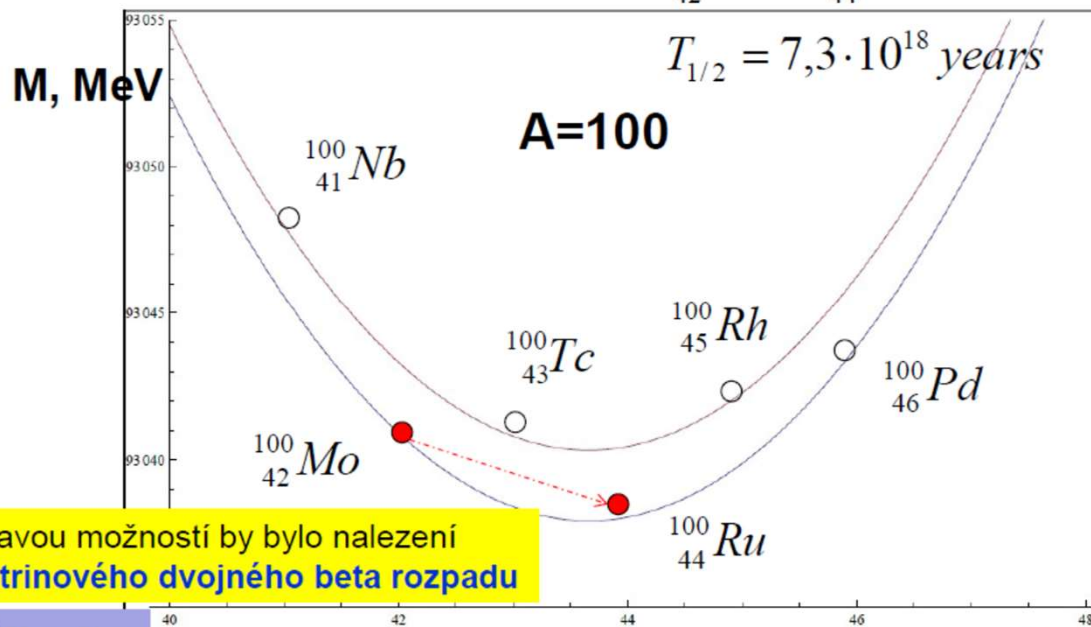
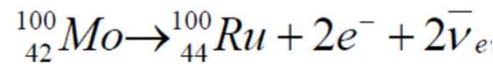
T. Kajita, Experimental Outlook at Neutrino 2018

Hlavní otázky současné neutrinové fyziky

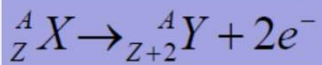
2. Narušení leptonového čísla – jsou neutrina Dirakovské nebo Majoranovské částice, existuje bezneutrinový dvojný rozpad?

Dvojný beta rozpad Double beta decay

Je možný u některých sudo-sudých jader



Velmi zajímavou možností by bylo nalezení tzv. **bezneutrinového dvojného beta rozpadu**

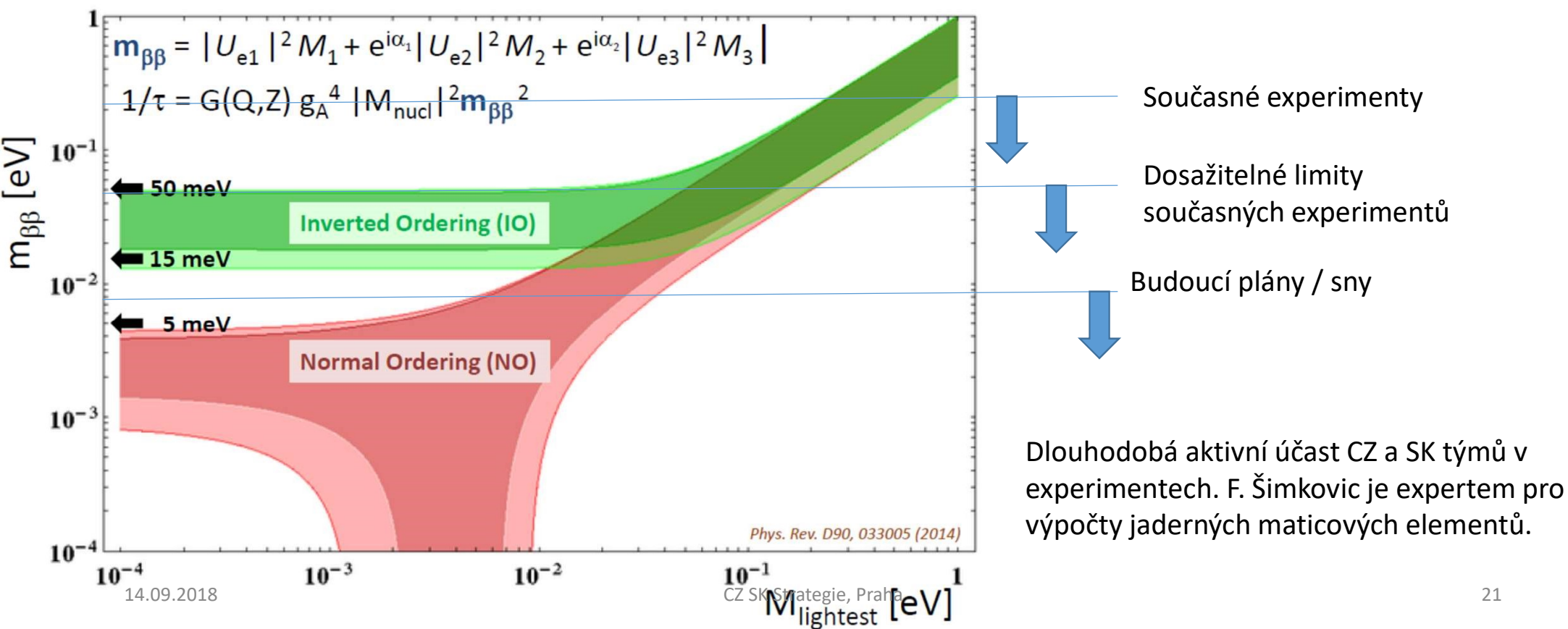


Ten je možný, pokud mají neutrina hmotu a jsou totožná s antineutriny. Jde o proces, který **nezachovává leptonové číslo**.

Energeticky není možné se dostat na nejnižší stav dvěma beta rozpady, pak existuje dvojný beta rozpad

Pokud by neutrina byla totožná s anti neutrinem, byl by možný i tzv. bezneutrinový dvojný beta rozpad s **nezachováním leptonového čísla**

$T_{1/2} \cong 1 / m_{\beta\beta}^2$ Chceme-li dvakrát upřesnit limit na hmotu neutrin, musíme měřit 4x delší poločasy rozpadu

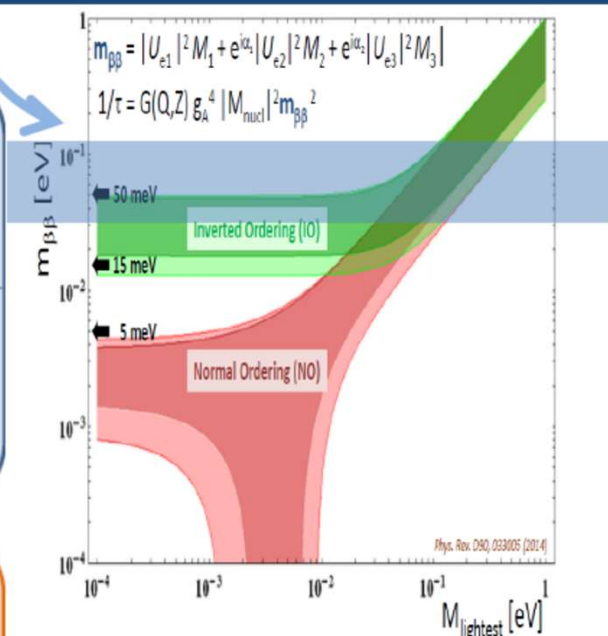


What next ?

(A. Giuliani)

source = detector

		NOW	MID-TERM	LONG-TERM
Scalability	Fluid embedded source	Xe-based TPC	EXO-200 NEXT-10	nEXO NEXT-100 PandaX-III NEXT-2.0 PandaX-III 1t
		Liquid scintillator as a matrix	KamLAND-Zen 800 SNO+ phase I	KamLAND2-Zen SNO+ phase II
High ΔE and ϵ	Crystal embedded source	Germanium diodes	GERDA-II MJD	LEGEND 200 LEGEND 1000
		Bolometers	AMoRE pilot, I CUORE CUPID-0, CUPID-Mo	AMoRE II CUPID



Very exciting that the near future experiments begin to explore the IO region!

T. Kajita, Experimental Outlook at Neutrino 2018

3. Co víme o hmotách neutrin. Shrnutí měření hmoty neutrin

Současné horní limity

$m_{\nu e} < 2 \text{ eV}$ – přímé měření z konce beta rozpadu, bude upřesněno na **0,2-0,1 eV** v experimentu **KATRIN s aktivní CZ účastí**

$m_1+m_2+m_3 < 0,5 \text{ eV}$ (0,2 eV) nepřímý limit z kosmologie

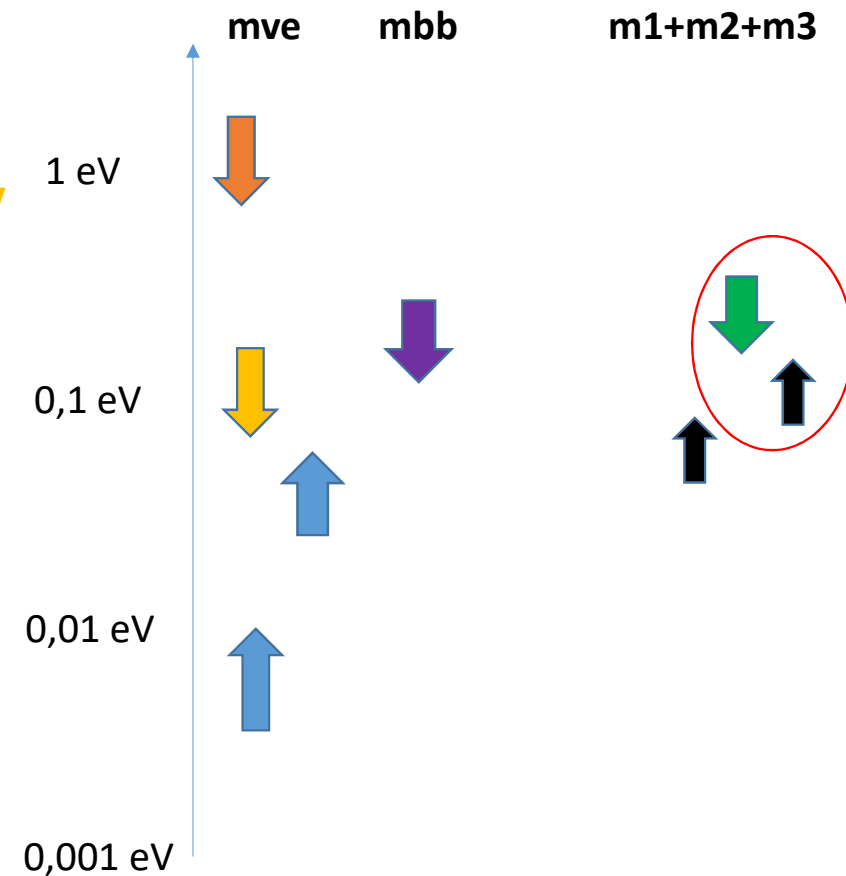
$m_{\beta\beta} < 0,3 \text{ eV}$ – jen pokud jsou Majoranovská

Současné spodní limity

Oscilace

$m_{\nu e} > 4 \text{ meV}$ (50 meV) normální (inverzní) hierarchie hmot

$m_1+m_2+m_3 > 58 \text{ meV}$ (100 meV) normální (inverzní) hierarchie hmot



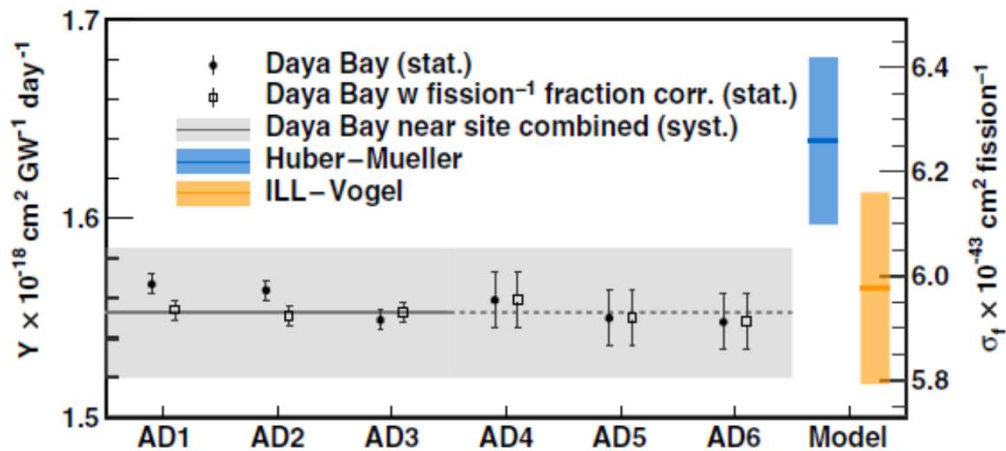
Kombinace výsledků oscilací a kosmologických experimentů může být brzy citlivá na tvar hmotové hierarchie.

Samozřejmě s napětím čekáme na výsledky KATRIN, zejména pokud by se podařilo změřit hmotu neutrin anebo posunout horní limit pod 50 meV.

Hlavní otázky současné neutrinové fyziky

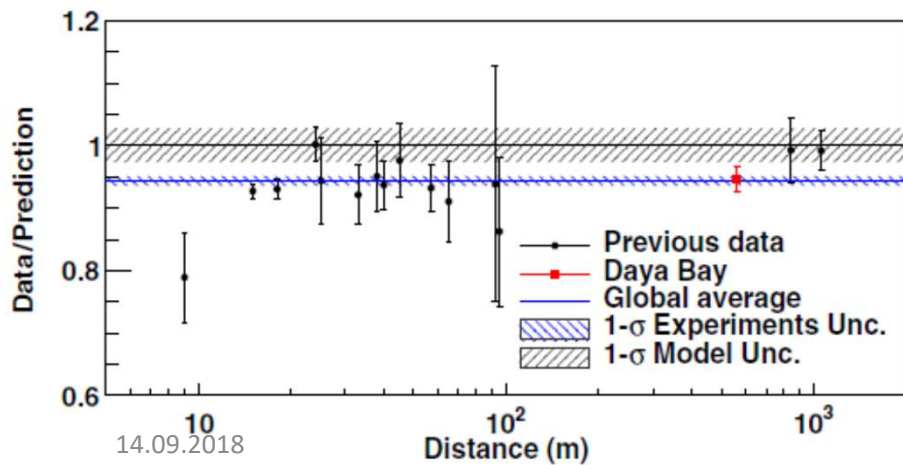
4. Existují další druhy (lehkých, sterilních) neutrin?

Reaktorová anomálie



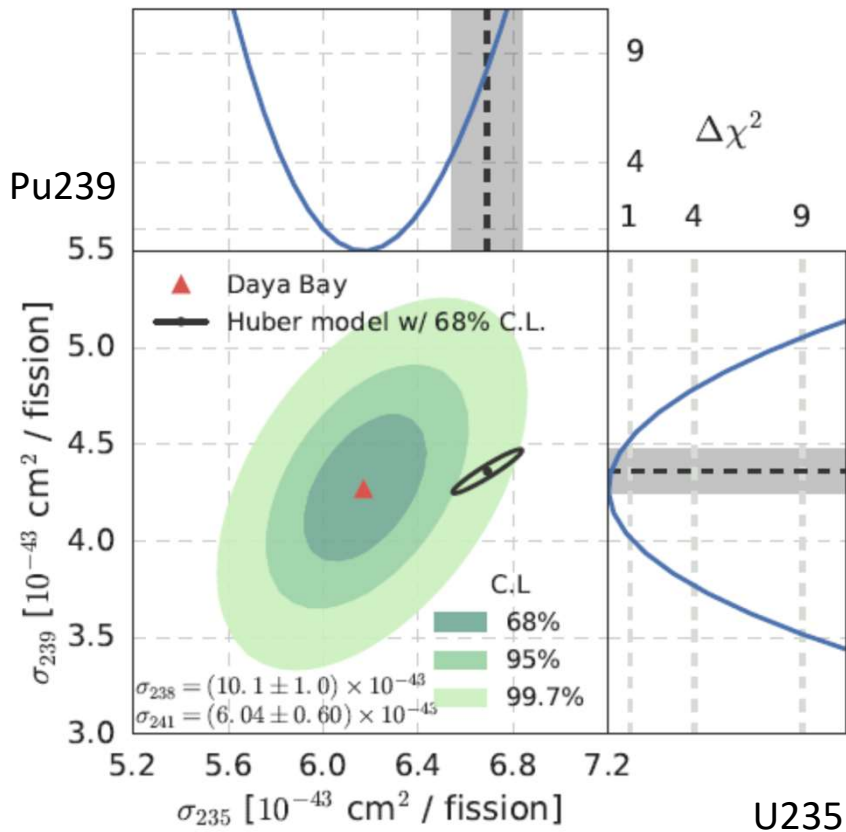
Celá řada experimentů měří asi 5% deficit toku reaktorových neutrin v porovnání s modelem.

To by mohlo být způsobeno velmi rychlými oscilacemi způsobených sterilními neutrinými s amplitudou asi 10%.



$$R_{\text{data/pred}} = 0.952 \pm 0.014(\text{exp.}) \pm 0.023(\text{model})$$

Daya Bay measurements confirm ~5% deficit of reactor neutrino flux compared to latest calculations in accord with other experiments.



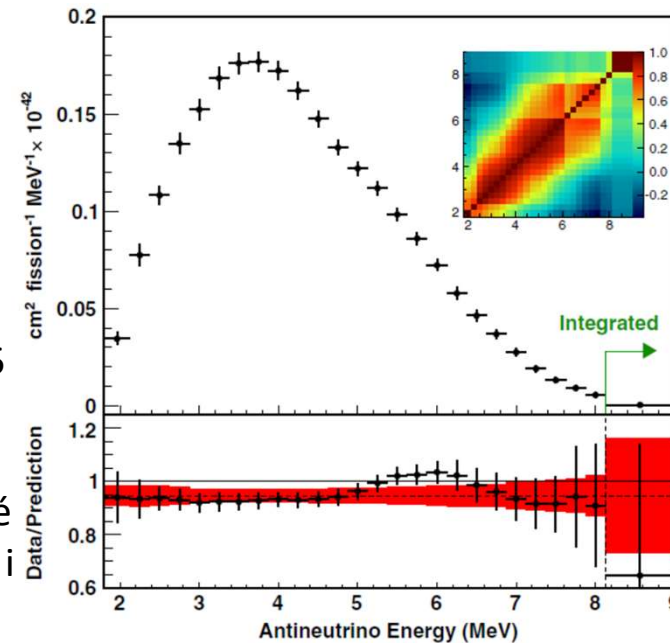
ALE:

1. Nový výsledek Daya Bay ukazuje, že 5% deficit reaktorových neutrin je způsoben jenom rozdílem v neutrinovém toku U235, Pu239 souhlasí. Efekt je ale jen asi 2,5 sigma.

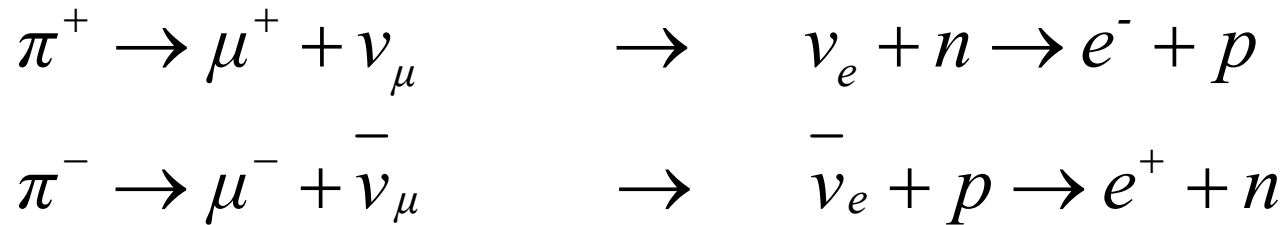
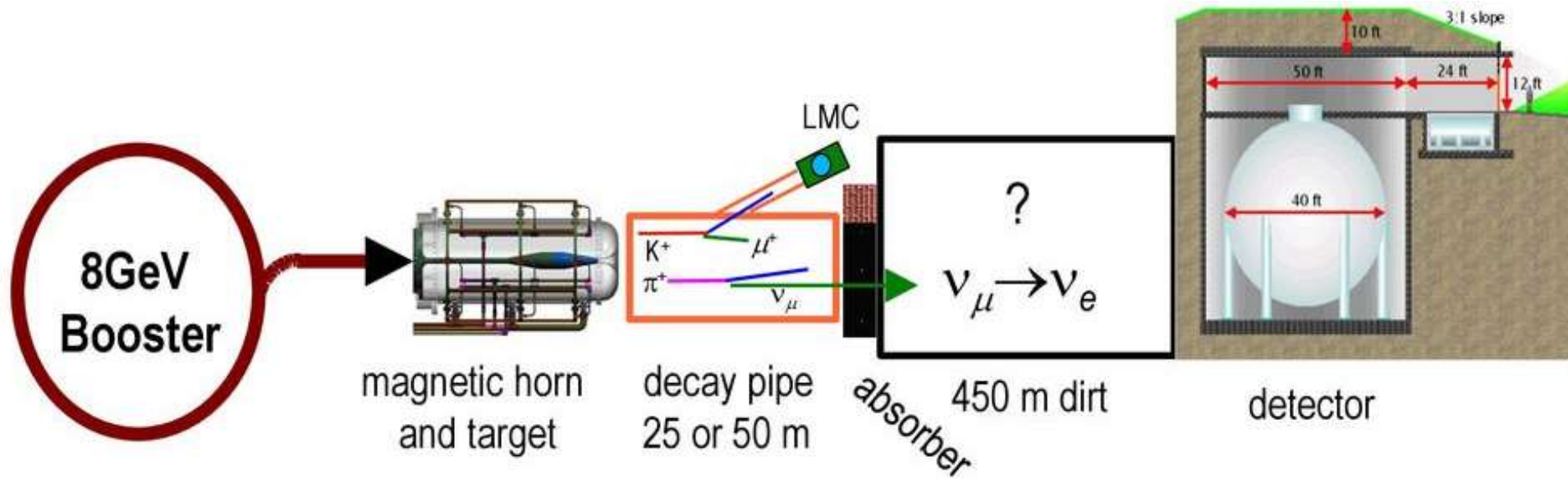
Odkud sterilní neutrina vědí, že mají vznikat jen v rozpadech štěpných produktů U?

2. Navíc se ukazuje, že modely nepředvídají správně tok reaktorových neutrin v oblasti okolo 5 MeV.

Tento efekt vidí všechny tři reaktorové experimenty Daya Bay, Double Chooz i RENO. Navíc RENO a Double Chooz prokázaly, že efekt je úměrný výkonu reaktoru, tj. je způsoben neutrinou ze štěpení



Nový výsledek MiniBooNE



Nový výsledek MiniBooNE

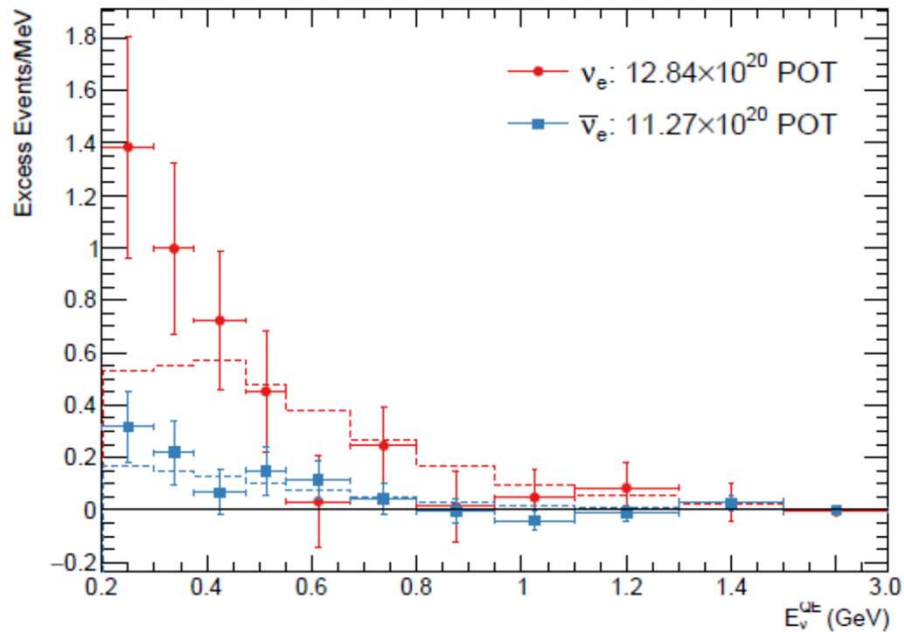


FIG. 2: The MiniBooNE total event excesses as a function of E_{ν}^{QE} in both neutrino mode and antineutrino mode, corresponding to 12.84×10^{20} POT and 11.27×10^{20} POT, respectively. (Error bars include both statistical and correlated systematic uncertainties.) The dashed curves show the best fits to the neutrino-mode and antineutrino-mode data assuming standard two-neutrino oscillations.

14.09.2018

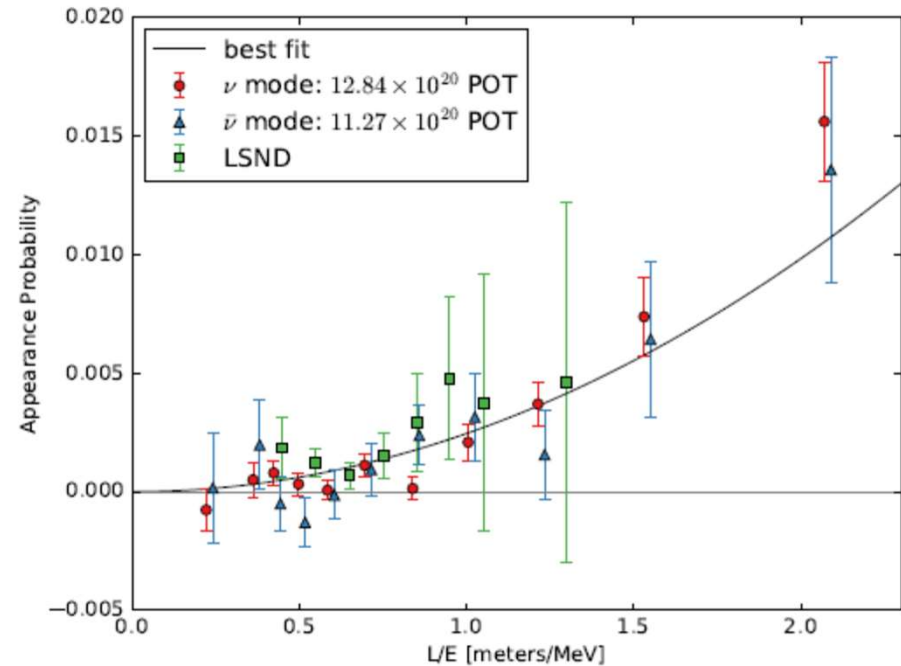


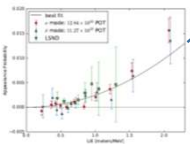
FIG. 3: A comparison between the L/E_{ν}^{QE} distributions for the MiniBooNE data excesses in neutrino mode (12.84×10^{20} POT) and antineutrino mode (11.27×10^{20} POT) to the L/E distribution from LSND [1]. The error bars show statistical uncertainties only. The solid curve shows the best fit to the LSND and MiniBooNE data assuming standard two-neutrino oscillations. The excess of MiniBooNE electron-neutrino candidate events is consistent with the LSND excess.

$$dm^2 = 0,04eV^2$$

$$1,27dm^2[eV^2] \frac{L[m]}{E[MeV]} = \pi/2 \Rightarrow \frac{L[m]}{E[MeV]} = \frac{\pi/2}{1,27dm^2[eV^2]} = 31m/MeV$$

$$\sin^2 2\theta = 0,894$$

Výsledek měření v oblasti 0 až 3 m/MeV předpovídá existenci oscilačního maxima v 31 m/MeV??



31m / MeV

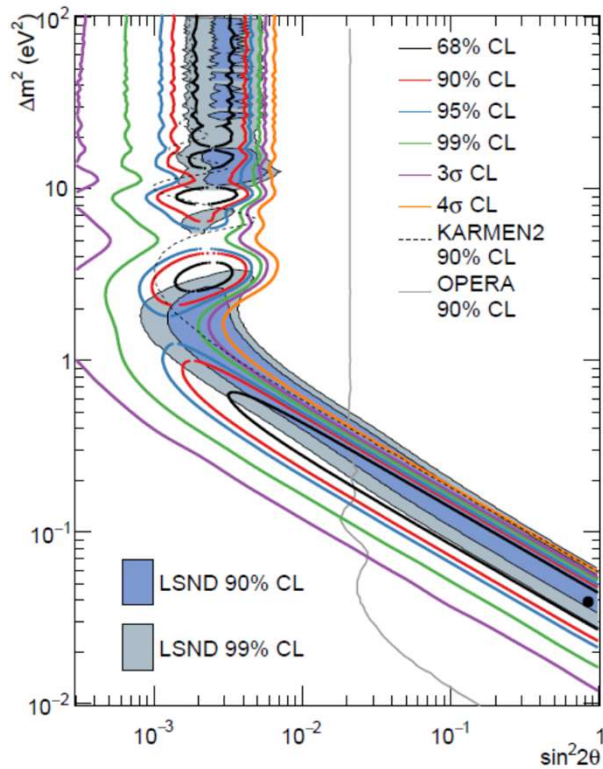
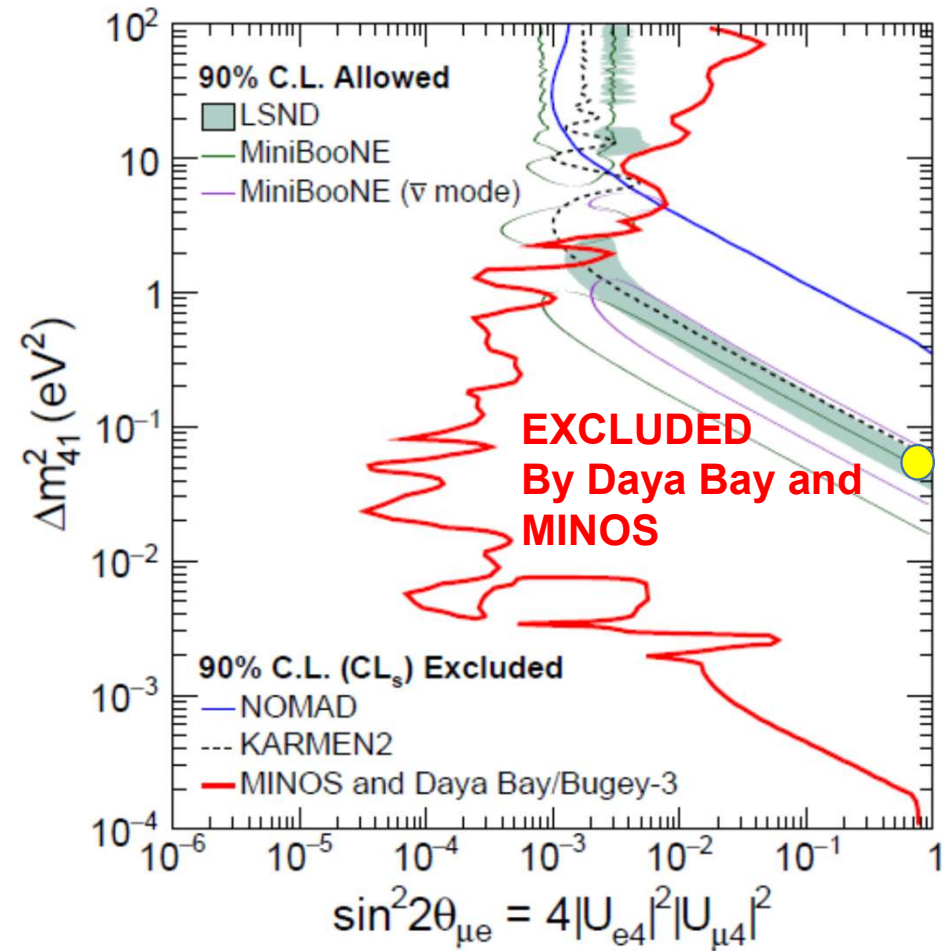


FIG. 4: MiniBooNE allowed regions in neutrino mode (12.84×10^{20} POT) for events with $200 < E_\nu^{QE} < 1250$ MeV within a two-neutrino oscillation model. The shaded areas show the 90% and 99% C.L. LSND $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ allowed regions. The black circle shows the MiniBooNE best fit point. Also shown are 90% C.L. limits from the KARMEN [34] and OPERA [35] experiments.



Předpovězený výsledek leží v oblasti vyloučené jinými experimenty.
 Situace kolem existence sterilních neutrin je dále nejasná.

A comment before Summary

- Although I essentially discussed future large neutrino projects, I think one of the strength of the neutrino field is the diversity of the researches.
- As we heard in this conference, there are variety of research activities, from small experiments to very large projects. Varieties of experimental techniques, various experimental, phenomenological and theoretical ideas.
- We should keep this style.

Update Evropské Strategie 2013:

f) Rapid progress in neutrino oscillation physics, with significant European involvement, has established a strong scientific case for a **long-baseline neutrino programme exploring CP violation and the mass hierarchy in the neutrino sector.**

CERN should develop a neutrino programme to pave the way for a substantial European role in future long-baseline experiments.

VZNIKLA NEUTRINOVÁ PLATFORMA V CERN

Europe should explore the possibility of major participation in leading long-baseline neutrino projects in the US and Japan.

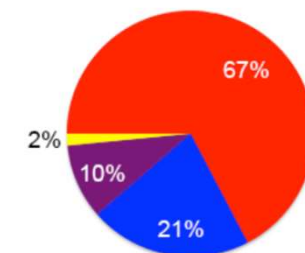
TO SE PODAŘILO JAK VIDNO Z PŘILOŽENÝCH GRAFŮ

Pro současný update Strategie očekávám, že v něm bude vyjádření ohledně budoucích experimentů DUNE a Hyper-K.

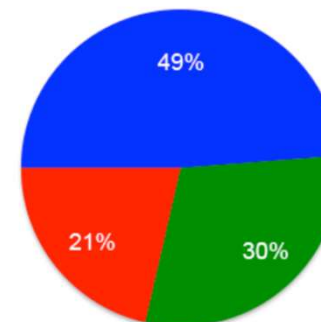
Určitě se bude diskutovat detekce neutrin z exploze Supernov, případně detekce v koincidenci z pozorováním gravitačních vln.

Je skvělé, že jsme zapojeni v experimentu DUNE.

Měli bychom zvážit účast v Hyper-K? Také proto, že Hyper-K bude nejlepším detektorem pro hledání rozpadu protonu na π^0 a pozitron.



NOvA 193 authors [51]



T2K 322 authors [50]

EVROPA

US

ASIA

Určitě se bude diskutovat otázka, zda potřebujeme vysokoenergetické zdroje elektronových neutrin?

$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}$	$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}$	$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\tau}$
$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e}$	$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu}$	$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}$
$P_{\nu_\tau \rightarrow \nu_e}$	$P_{\nu_\tau \rightarrow \nu_\mu}$	$P_{\nu_\tau \rightarrow \nu_\tau}$

$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e}$	$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu}$	$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau}$
$P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e}$	$P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu}$	$P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\tau}$
$P_{\bar{\nu}_\tau \rightarrow \bar{\nu}_e}$	$P_{\bar{\nu}_\tau \rightarrow \bar{\nu}_\mu}$	$P_{\bar{\nu}_\tau \rightarrow \bar{\nu}_\tau}$

V současnosti můžeme zkoumat narušení CP pouze z rozdílu:

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} - P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e}$$

Pokud by se podařilo oživit plány na dostatečně silné zdroje vysokoenergetických elektronových neutrin (např. NuSTORM, neutrina z rozpadu urychlených mionů), byla by možnost studovat

CP také v

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} - P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu}$$

a navíc narušení T invariance v

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} - P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} \quad P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu} - P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e}$$

Získali bychom přesná data o účinných průřezích interakcí elektronových neutrin na jádrech, nutná pro přesnou interpretaci výsledků DUNE a Hyper-K.

Další důležitá příležitost diskutovat budoucnost neutrinové fyziky bude Neutrino Town Meeting, CERN 22.-24.10.