

ESSnuSB projekt

Jesenska škola fizike ZEF-a 2019
12.09.2019.

dr. Budimir Kliček

Fotonika i kvantna optika

Centar izvršnosti za napredne materijale i senzore

Institut Ruđer Bošković

<http://cems.irb.hr>



Projekt sufinancira Europska unija iz Europskog fonda za regionalni razvoj



INSTITUT ZA FIZIKU



Europska unija
Zajedno do fondova EU



Ministarstvo
znanosti i
obrazovanja



MINISTARSTVO
REGIONALNOG RAZVOJA
I FONDOVA EUPSKE UNIJE



Operativni program
**KONKURENTNOST
I KOHEZIJA**

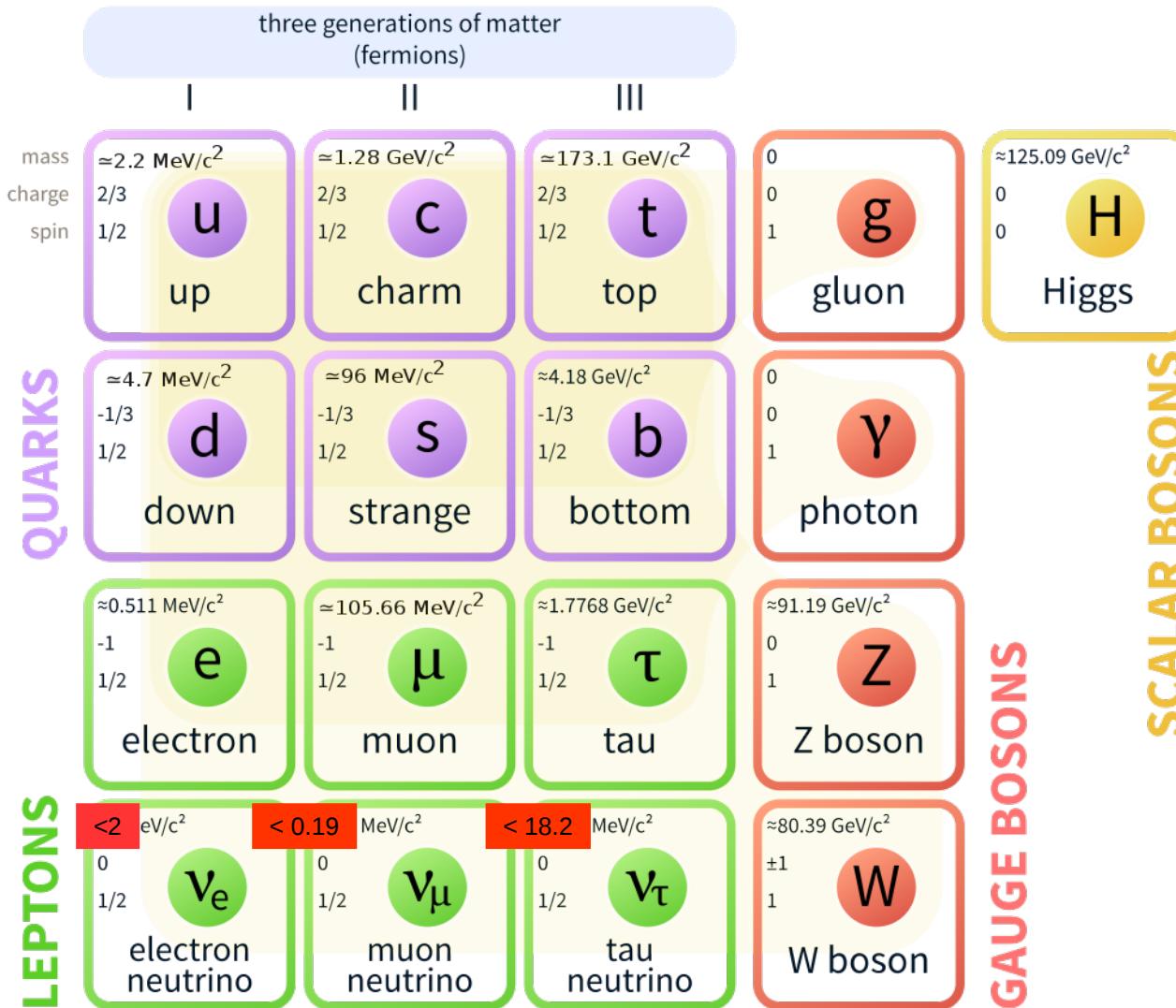


ESSnuSB projekt

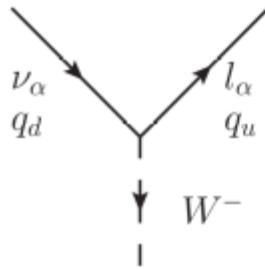
Studija dizajna za eksperiment koji će ispitati **CP narušenje** preko **oscilacija neutrina** u drugom maksimumu oscilacija.

Čestice standardnog modela

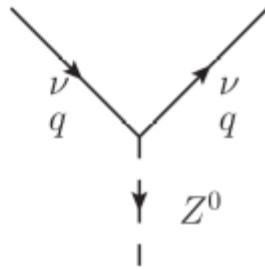
Standard Model of Elementary Particles



Slabe interakcije



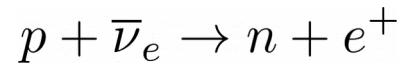
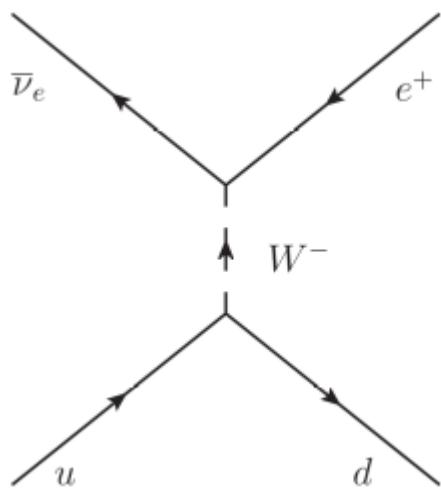
Charged current (CC)



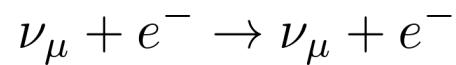
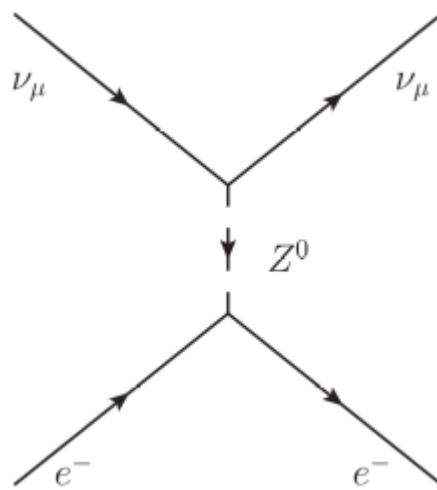
Neutral current (NC)

$$\begin{pmatrix} l_\alpha \\ \nu_\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \text{ or } \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \text{ or } \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} q_u \\ q_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \text{ or } \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} \text{ or } \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}$$



Inverzni beta raspad



Raspršenje neutrina na elektronu

$$M_W = (80.385 \pm 0.015) \text{ GeV}$$

$$M_Z = (91.1876 \pm 0.0021) \text{ GeV}$$

Slabe interakcije su slabe
zbog velike mase W i Z bozona

Oscilacije neutrina

Neutrino proizveden u jednom stanju okusa može biti u drugom stanju okusa kad ga se detektira.

Stanje okusa neutrina nije
i stanje mase neutrina

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} = U^* \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix}$$
$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^n U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle$$

↑ ↑ ↑
stanje okusa matrica miješanja stanje mase

ν_i ima masu m_i

- $U_{\alpha i}$ se zove PMNS (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata) matrica
- $U_{\alpha i}$ mora biti unitarna jer i stanja okusa i stanja mase moraju biti ortonormirana
 - za n generacija je to $n \times n$ kompleksna matrica

Oscilacije neutrina u 3 generacije

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{cp}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{cp}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

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

$$\begin{aligned} \alpha &= e, \nu, \tau \\ \beta &= e, \nu, \tau \end{aligned}$$

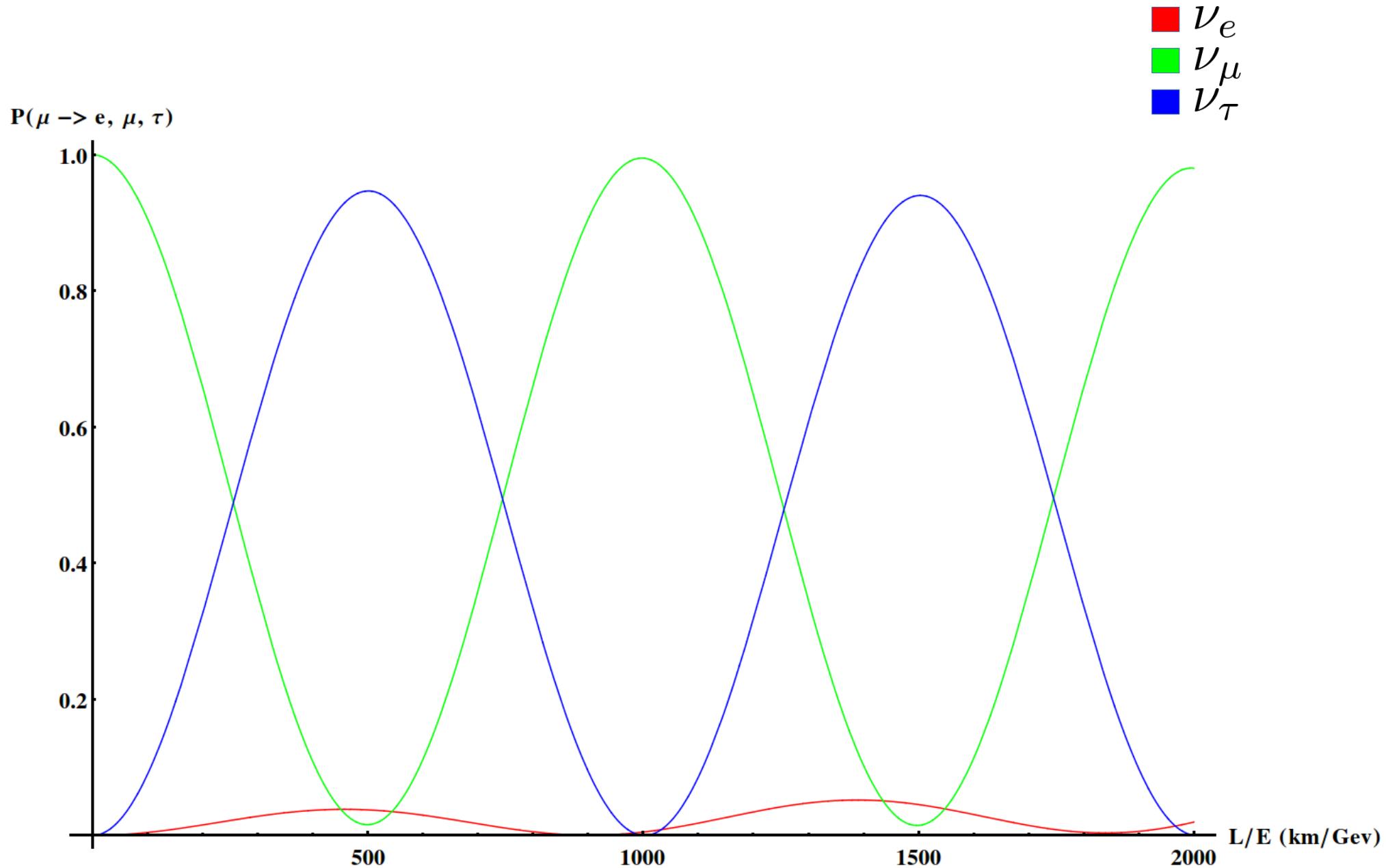
$$\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$$

$$A_{ij}^{\alpha \beta} \equiv U_{\alpha i}^* U_{\alpha j} U_{\beta i} U_{\beta j}^*$$

$$\begin{aligned} s_{ij} &\equiv \sin \theta_{ij} \\ c_{ij} &\equiv \cos \theta_{ij} \end{aligned}$$

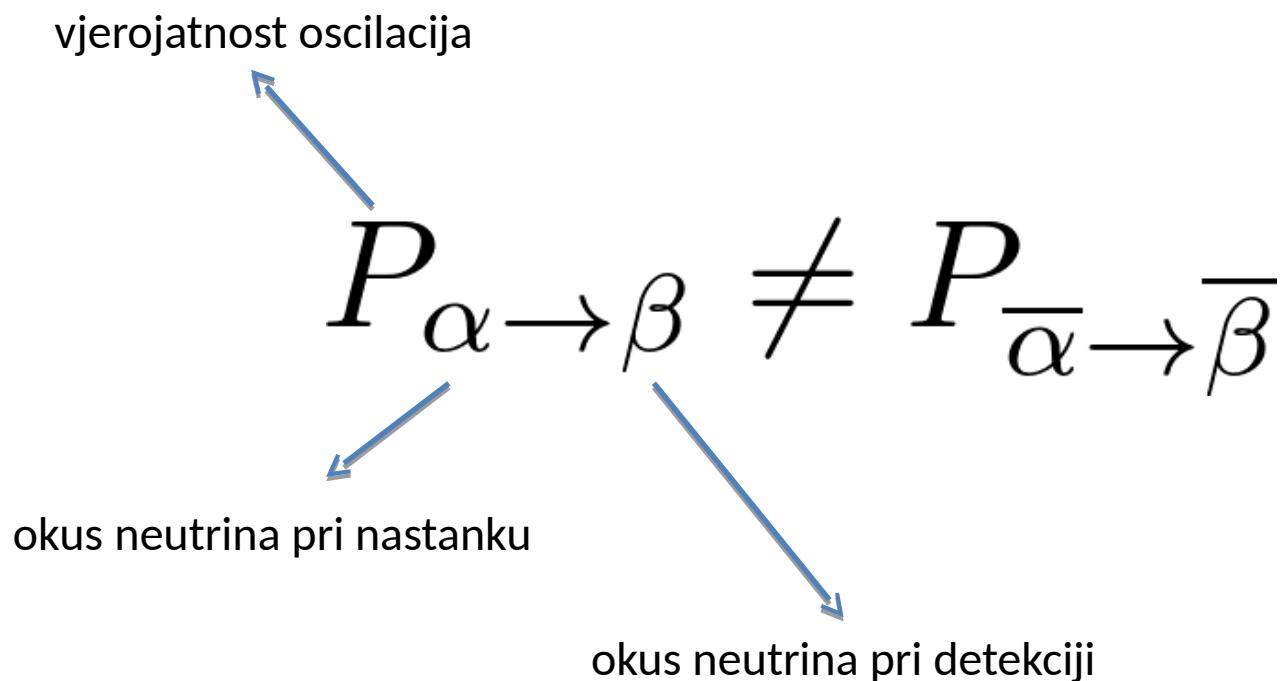
Ukupno 6 parametara: $\Delta m_{21}^2, \Delta m_{32}^2, \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta_{cp}$

Oscilacije mionskih neutrina



CP narušenje u oscilacijama neutrina

CP narušenje predviđa da je vjerojatnost oscilacija različita za neutrine i antineutrine.



CP narušenje u ESSnuSB-u

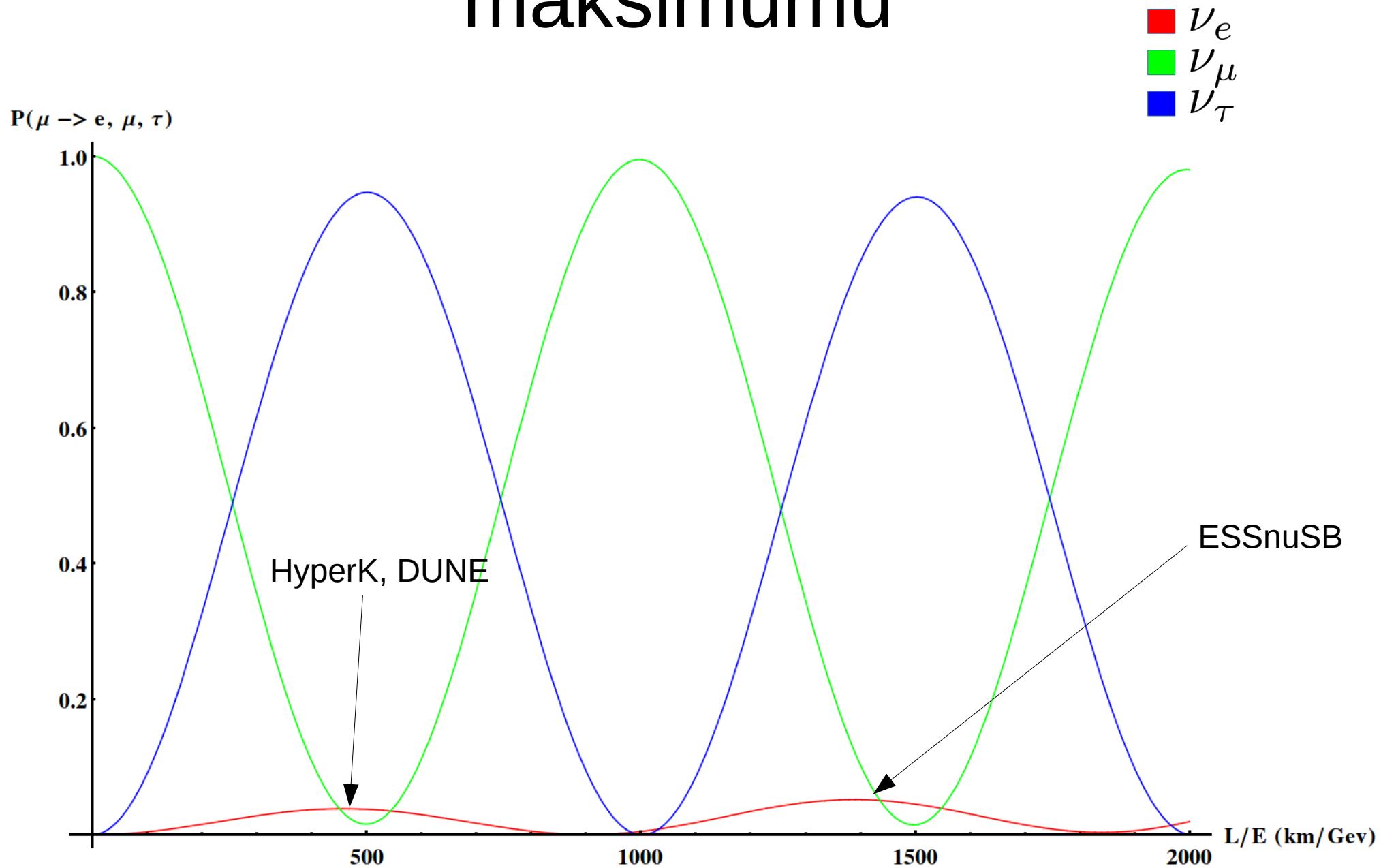
$$P_{\mu \rightarrow e} \neq P_{\bar{\mu} \rightarrow \bar{e}}$$

ESSnuSB će proučavati pojavu elektronskih (anti)neutrina u snopu mionskih (anti)neutrina.

Plan:

1. Koristiti zraku ν_μ i opažati ν_e
2. Koristiti zraku $\bar{\nu}_\mu$ i opažati $\bar{\nu}_e$
3. ??? - studija dizajna (ESSnuSB)
4. Profit - (ne)opažanje CP narušenja

ESSnuSB gleda oscilacije u drugom maksimumu



Zašto drugi maksimum oscilacija?

Dobro

$$\frac{(P_{\mu \rightarrow e} - P_{\bar{\mu} \rightarrow \bar{e}}) @ \text{2nd osc. max.}}{(P_{\mu \rightarrow e} - P_{\bar{\mu} \rightarrow \bar{e}}) @ \text{1st osc. max.}} \sim 3$$

U vakuumu ovaj omjer ovisi samo o razlikama kvadrata masa neutrina

Loše

Manji broj interakcija neutrina (veća statistička pogreška)

- Ako se pomaknemo 3x dalje, fluks je 9x manji
- Smanjimo energiju 3x – udarni presjeci barem 3x manji

Optimalno:

Sistematska pogreška je slična u prvom i drugom maksimumu

- Ako je statistička pogreška u drugom maksimumu usporediva ili manja od sistematske, onda je drugi maksimum bolji
- Ako nije, onda je prvi maksimum bolji

Možemo li u drugi maksimum? (imamo li dovoljno neutrina?)

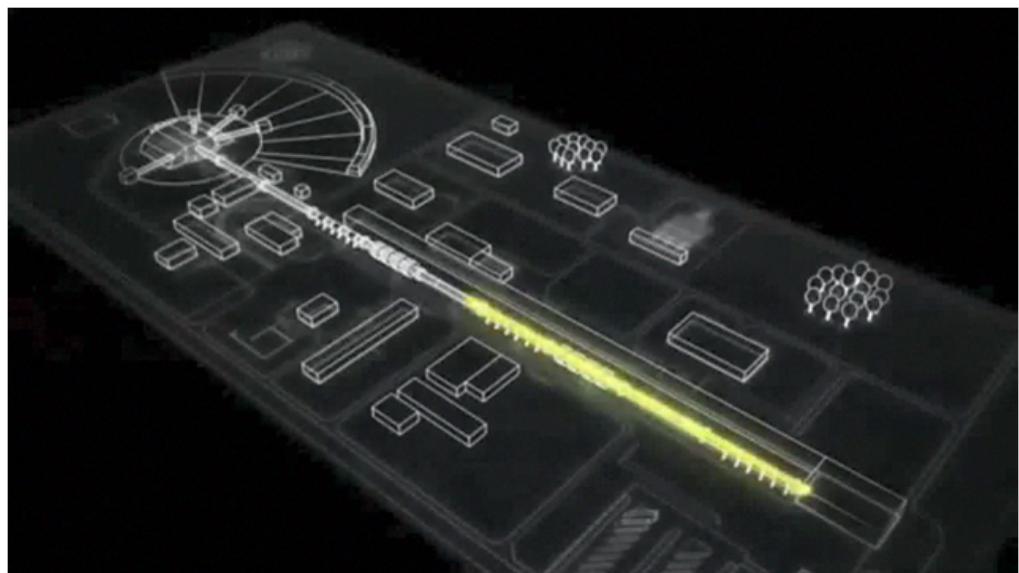
Linearni akcelerator vrlo velikog intenziteta je u izgradnji u Švedskoj.

Ubrzava 450 mg protona na godinu
do 94% brzine svjetlosti!

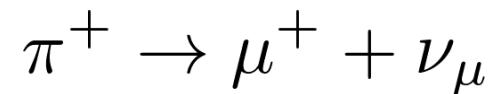
ESS – European Spalation
Source

Snaga 5 MW u prosjeku

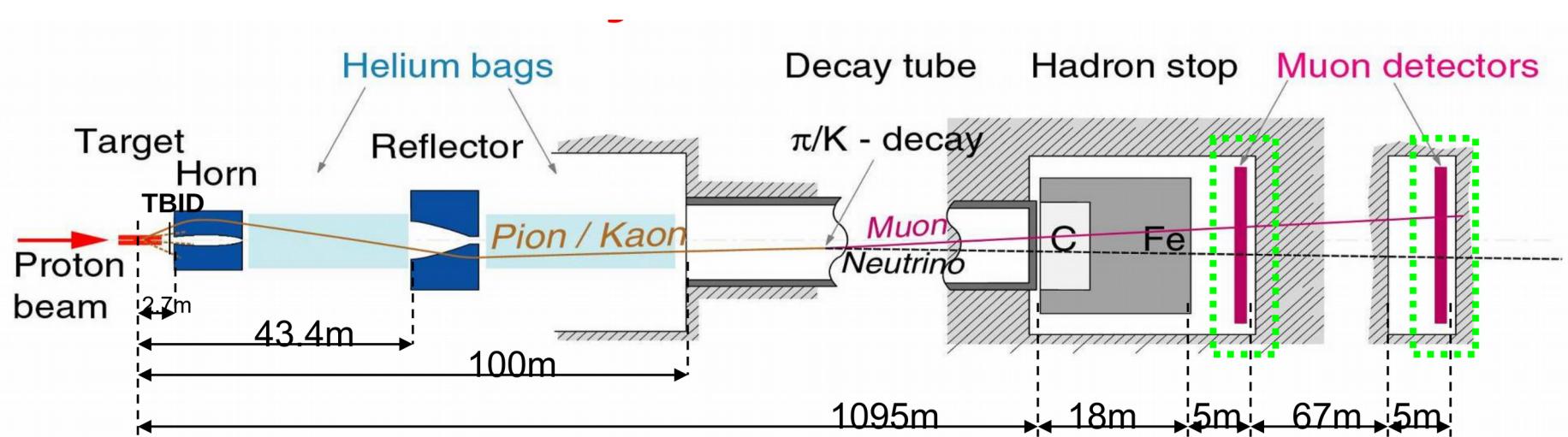
- usporedba – CERN SPS može do 450 kW u prosjeku



Proizvodnja zrake neutrina

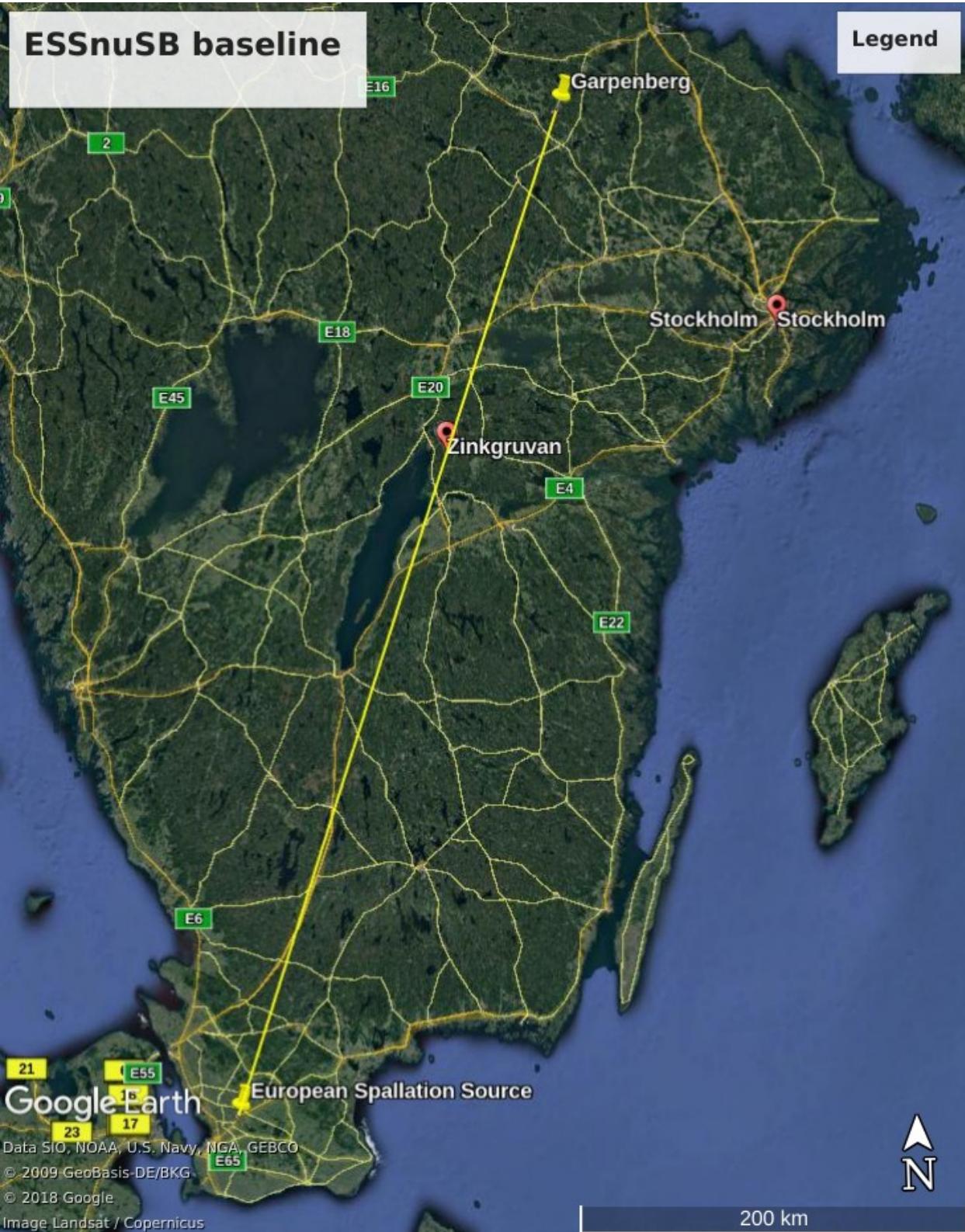


+ ostali mezonski raspadi



Primjer pogona za proizvodnju snopa neutrina (bivši CNGS na CERN-u)

ESSnuSB baseline



Položaji izvora i detektora

Izbor položaja:

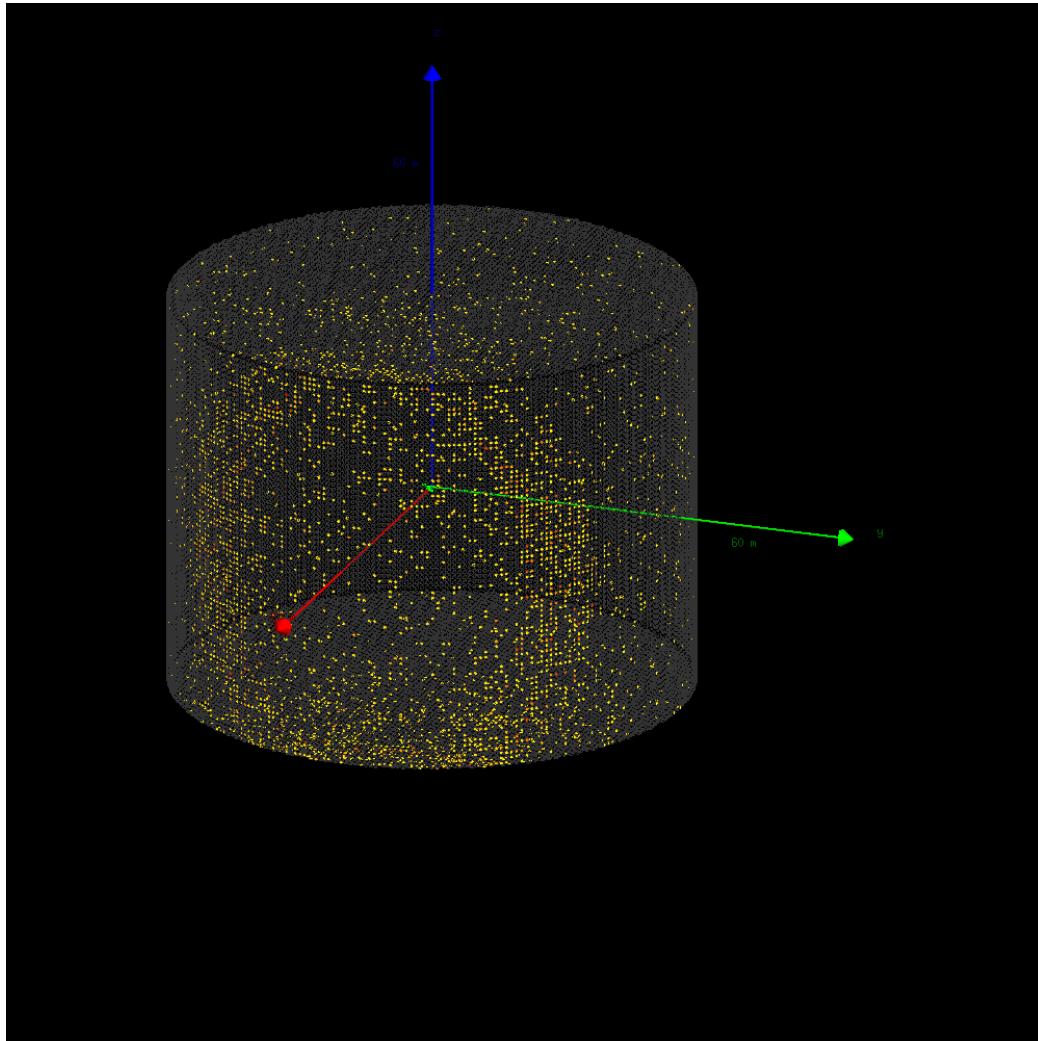
Osnovni dizajn:

- rudnik Garpenberg, 540 km od izvora neutrina, na drugom maksimumu oscilacija

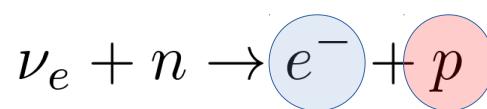
Alternative:

- rudnik Zinkgruvan, 340 km od izvora
- Garpenberg i Zinkgruvan

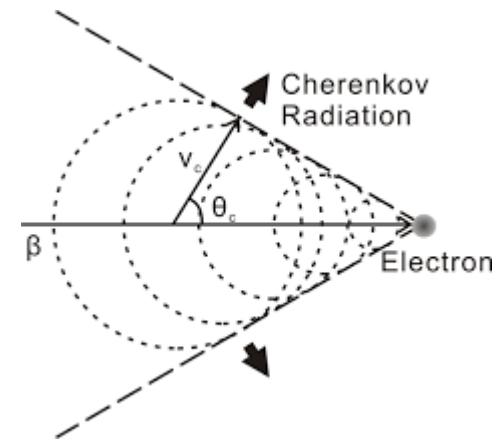
Udaljeni detektor



Simulacija udaljenoga detektora



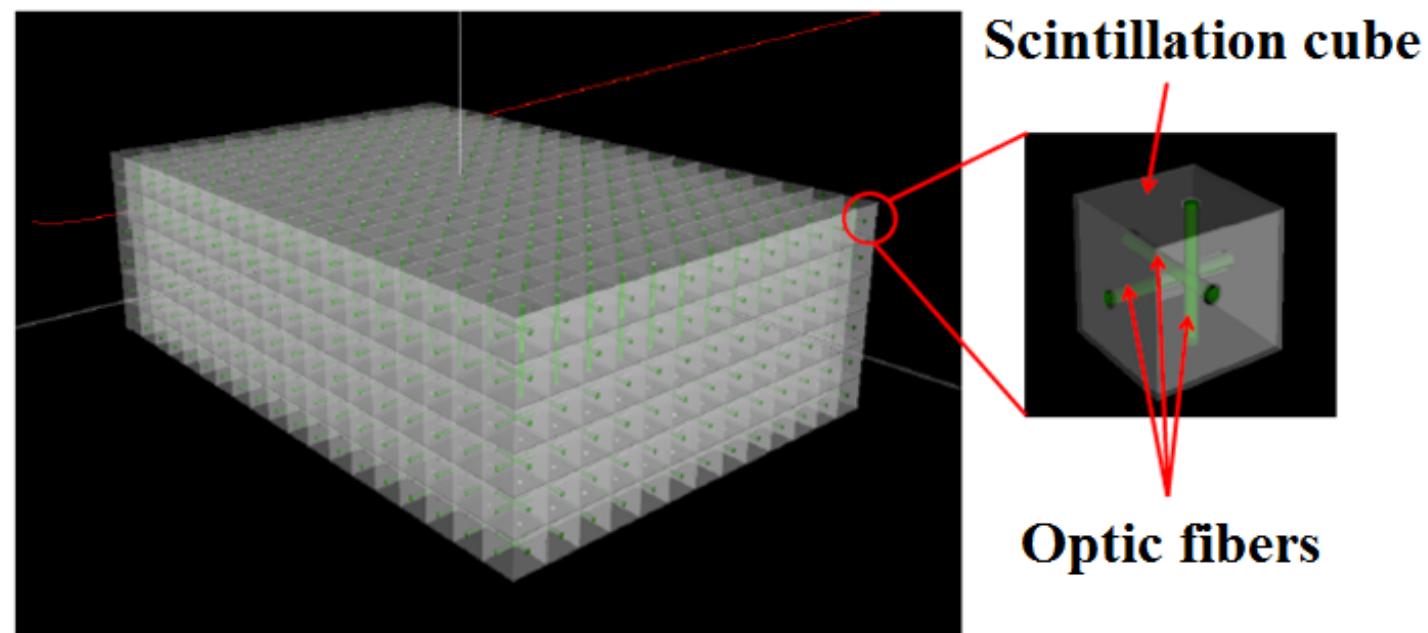
- 500 kt vodeni Čerenkovljev detektor



- Čerenkovljevo zračenje detektira se fotomultiplikatorima postavljenima na rub tanka
- moguća rekonstrukcija putanja i energija nabijenih čestica

Detektori blizu izvora

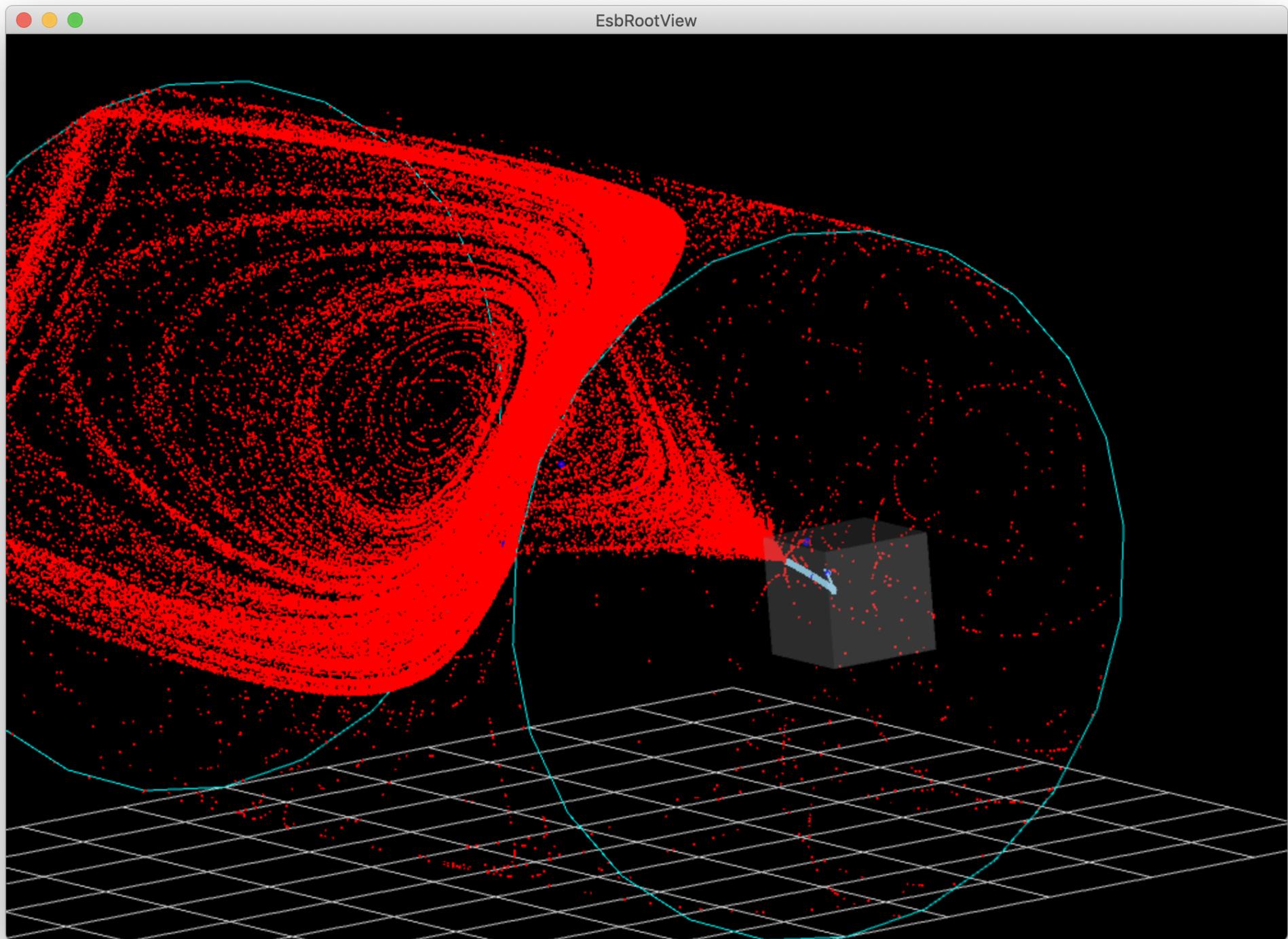
- Koriste za mjerjenje izvornog toka i udarnih presjeka neutrina
 - moramo znati izvorne okuse neutrina da bismo opazili oscilacije u daljem detektoru
- **Osnovni dizajn**
 - manji čerenkovljev detektor (1 kt) iza
 - scintilatorskog *tracker-a* (1-10) t



Super-FGD tracker (dizajn iz T2K eksperimenta)

Mogući dodatak – emulzijski detektor za precizno mjerjenje topologije izlaznih nabijenih čestica

Simulacija detektora blizu izvora neutrina

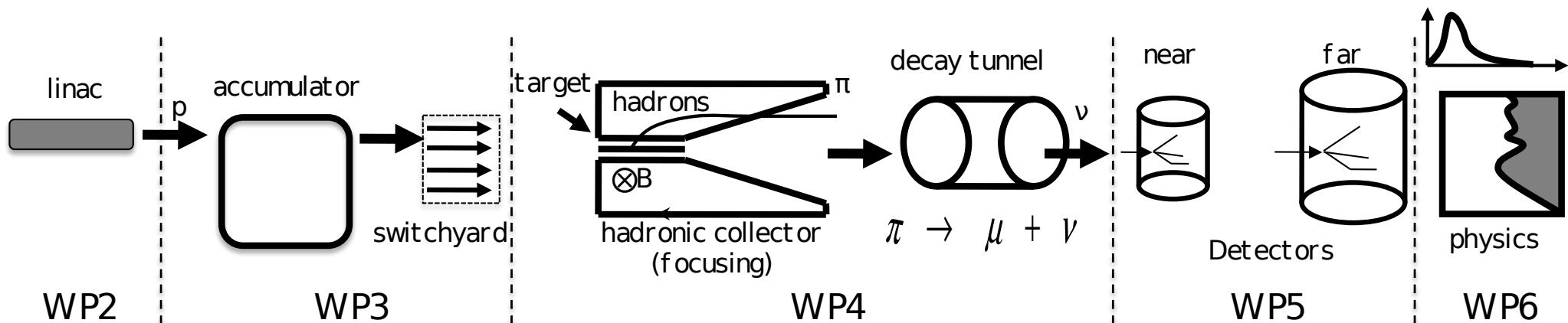


ESSvSB kao europski projekt



- Horizon 2020 studija dizajna (Call INFRADEV-01-2017)

- **Puno ime projekta:** Discovery and measurement of leptonic CP violation using an intensive neutrino Super Beam generated with the exceptionally powerful ESS linear accelerator
- **Trajanje:** 4 godine (1.1.2018 – 30.12.2021)
- **Ukupni trošak:** 4.7 M€
- **Financiranje EU:** 3 M€
- **15 instituta iz 11 zemalja**
- **6 radnih paketa**



Aktivnosti IRB-a

- Dizajn detektora
 - koordinacija izrade software-a za simulaciju eksperimenta
 - optimizacija udaljenoga detektora za maksimalnu osjetljivost na CP narušenje
- Upotreba eksperimenta za mjerjenje:
 - toka neutrina
 - udarnih presjeka za interakcije (anti)neutrina sa materijom
- **Studentski projekt:** istražiti mogućnost mjerjenja toka neutrina preko raspršenja neutrina na orbitalnim elektronima
(Kaja Krhač)

Hvala na pažnji!