

# Neutrino oscillaties waarnemen met KM3NeT en DUNE

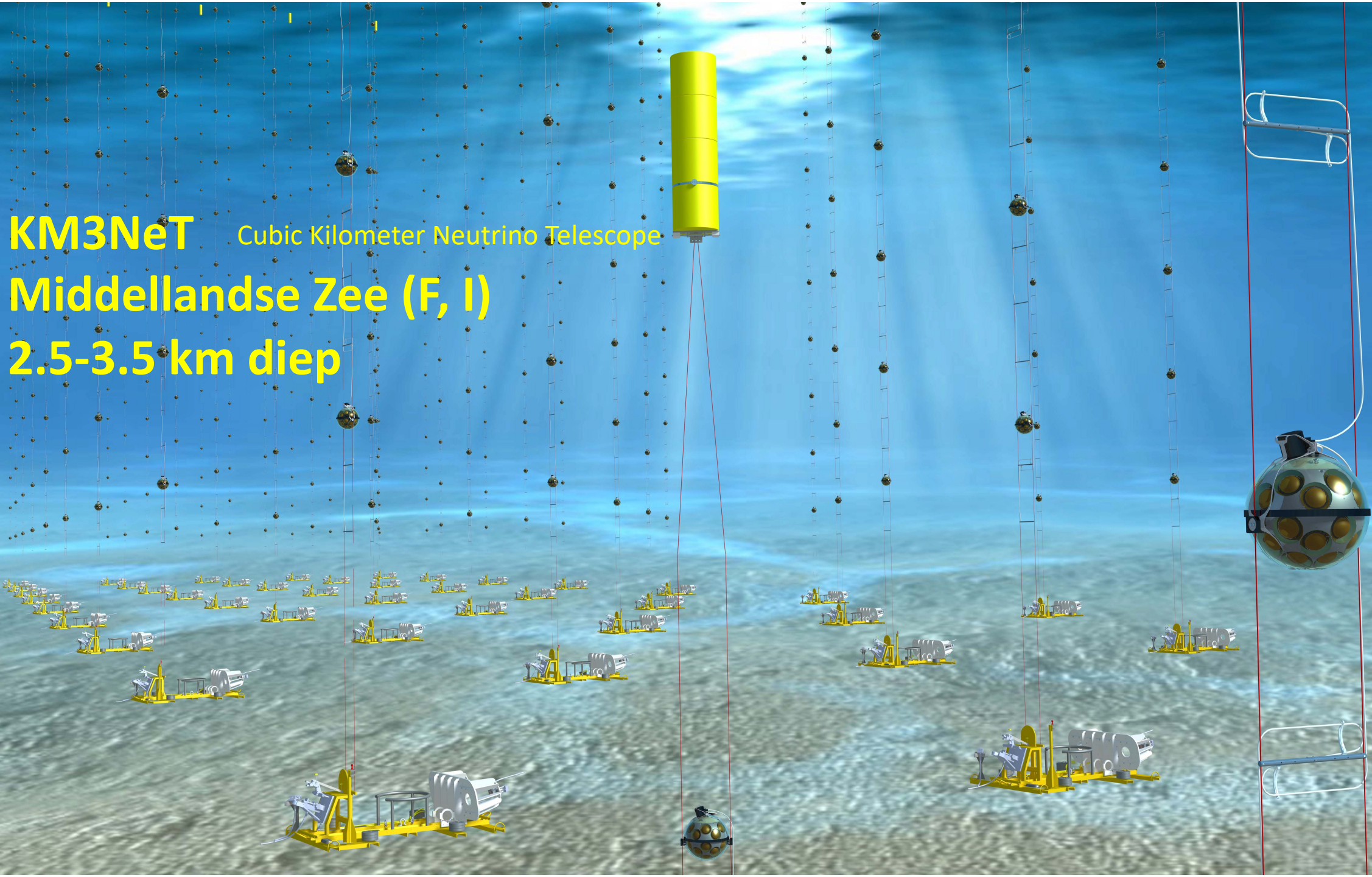


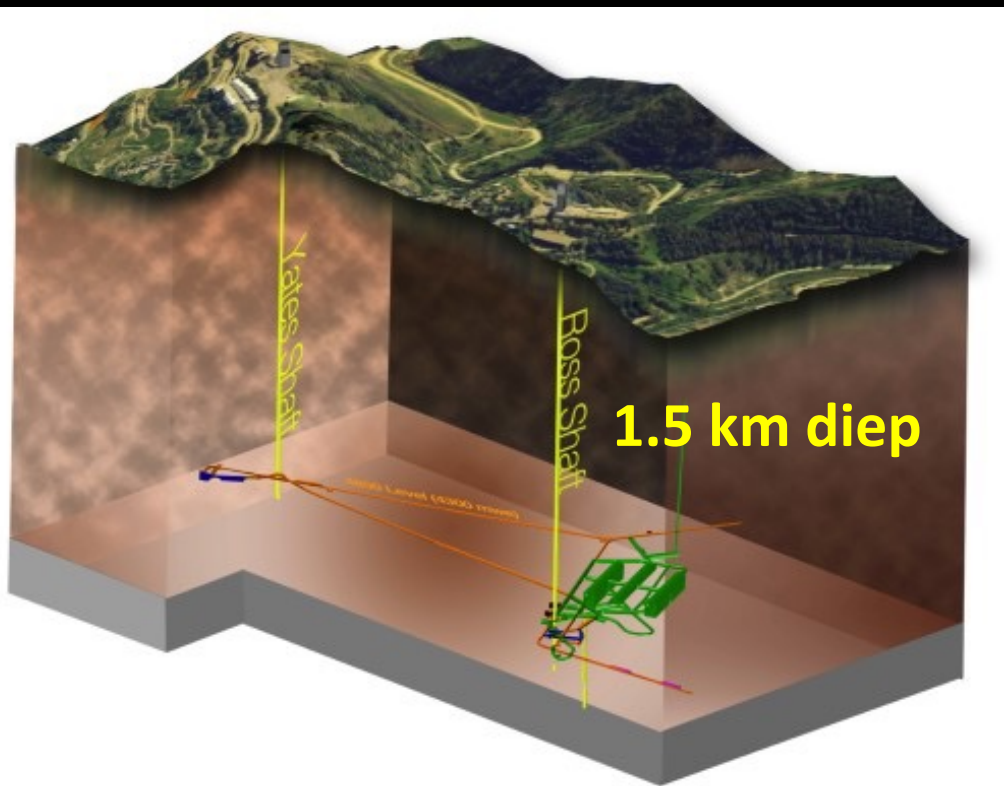
Paul de Jong, Universiteit van Amsterdam en Nikhef

**KM3NeT** Cubic Kilometer Neutrino Telescope

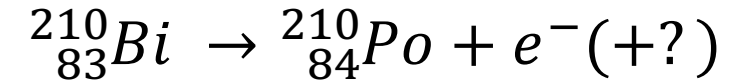
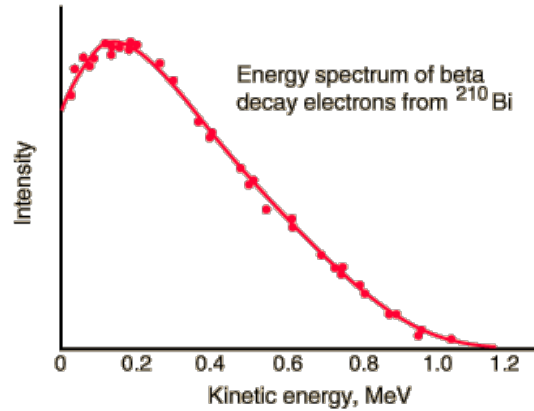
**Middellandse Zee (F, I)**

**2.5-3.5 km diep**





# Beta verval: crisis 1930?



Wolfgang Pauli, 4 december 1930:

*I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that in the nuclei there could exist electrically neutral particles, which I will call neutrons, that have spin 1/2 and obey the exclusion principle.*

*The continuous beta spectrum would then make sense with the assumption that in beta decay, in addition to the electron, a neutron is emitted such that the sum of the energies of neutron and electron is constant.*

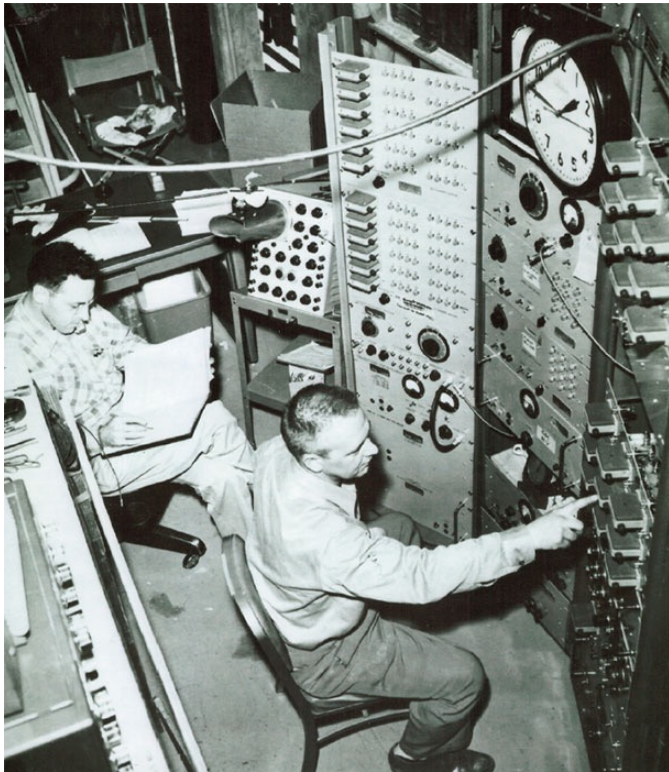
*I admit that my remedy may seem almost improbable because one probably would have seen those neutrons, if they exist, for a long time. But nothing ventured, nothing gained, and the seriousness of the situation, due to the continuous structure of the beta spectrum, is illuminated by a remark of my honored predecessor, Mr Debye, who told me recently in Bruxelles: "Oh, It's better not to think about this at all, like new taxes."*

(Enrico Fermi: "neutron"  $\rightarrow$  "neutrino")

# Neutrino's: experimentele ontdekking

Pauli, in dezelfde week in december 1930:

*"I've done a terrible thing, I've invented a particle that cannot be detected."*



Gelukkig had Pauli het fout!

Reines en Cowan: Project Poltergeist (1956)

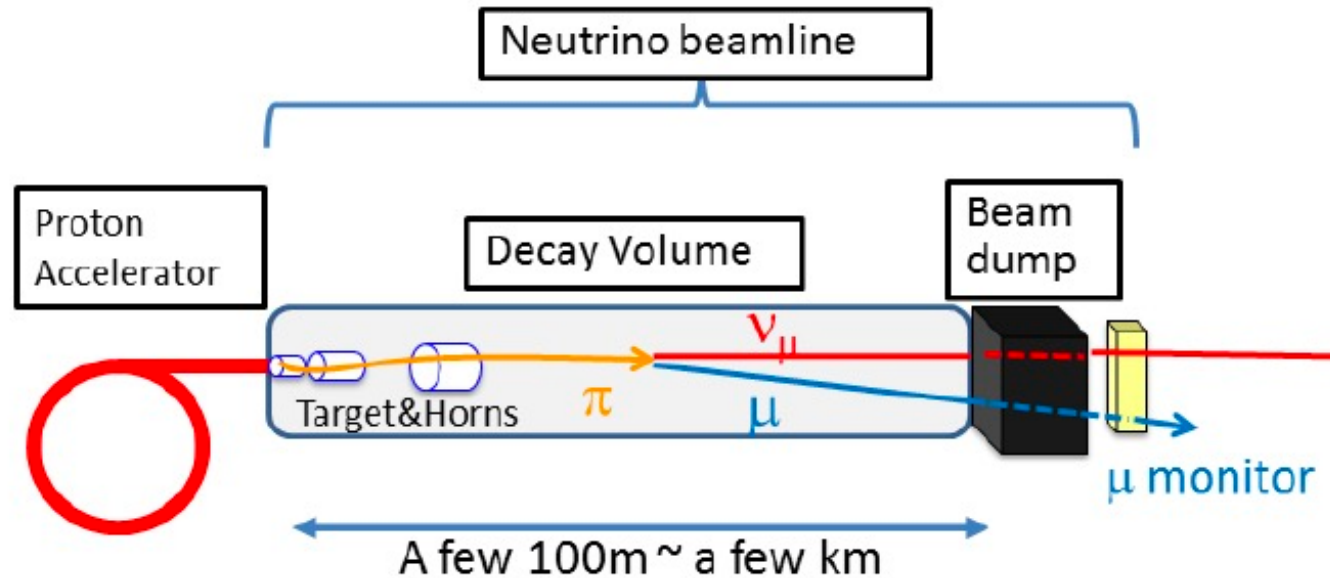
Detectie neutrino's afkomstig van een kernreactor

→ **Nodig: sterke bron, grote detector**

Bijvoorbeeld: de zon: op aarde nog  $70 \text{ miljard } \nu \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$   
(energie: enkele MeV)

# Neutrino's uit deeltjesversnellers

Brookhaven, 1962:



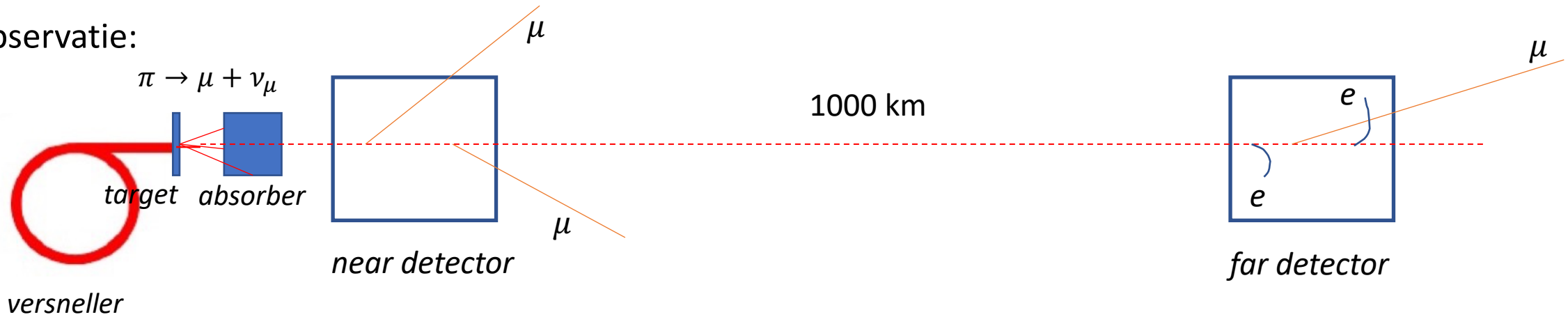
*Observatie: neutrino's uit pion verval zijn andere neutrino's dan die van een kernreactor!  
Deze neutrino's maken in een detector alleen maar muonen, nooit elektronen!*

Belangrijke les: elektron-neutrino's horen bij elektronen, muon-neutrino's bij muonen. Je kunt neutrino type herkennen aan het type lepton dat verdwijnt of gemaakt wordt. Sterker nog: dit is de definitie van de 'smaaktoestanden' van neutrino's.

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

# Huh, kunnen neutrino's van smaak veranderen?

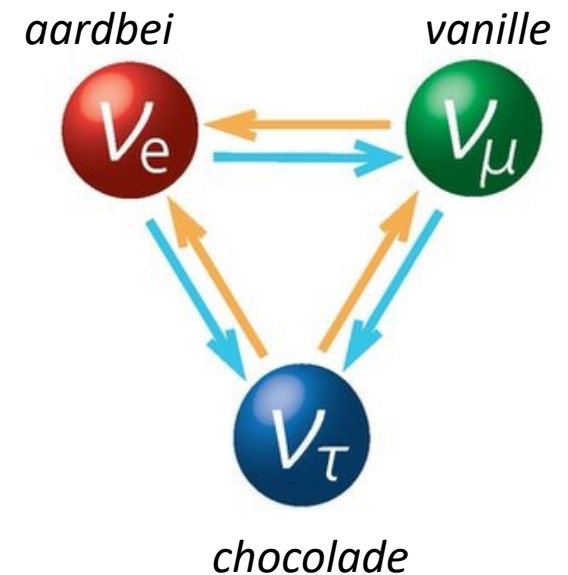
Observatie:



Bij afleggen grote afstanden kunnen neutrino's van smaak veranderen:

**neutrino oscillaties**

Gemeten sinds ~1998 door >10 experimenten



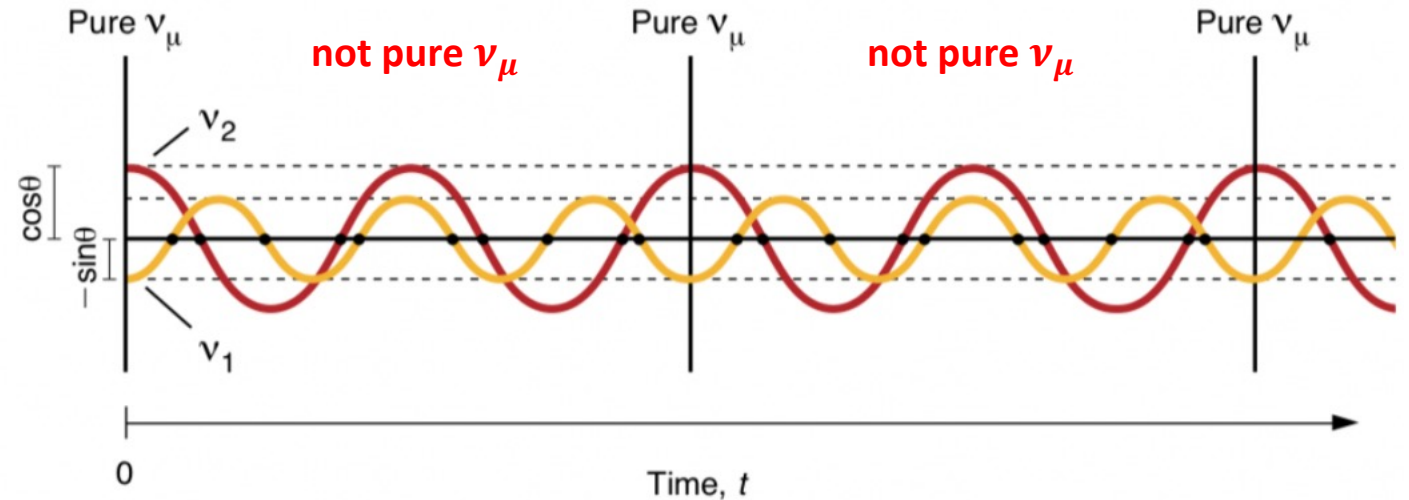
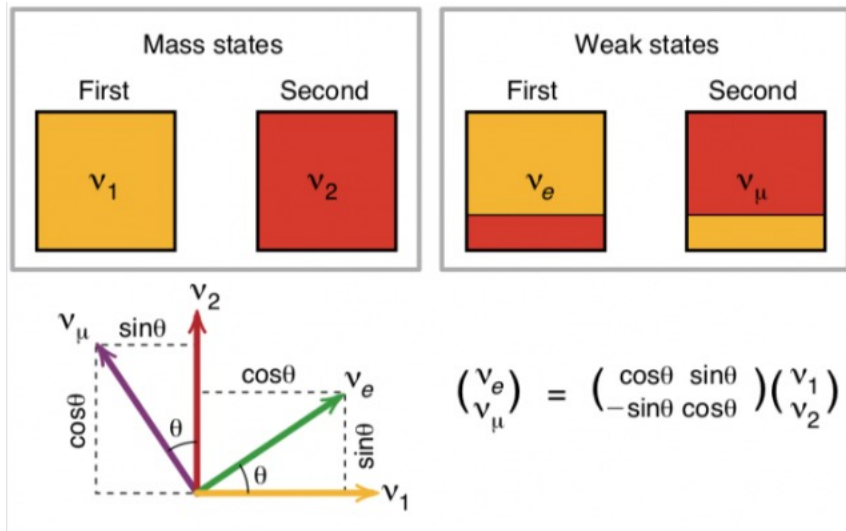




# Neutrino oscillaties:

Neutrino's als fysieke, reizende deeltjes met  $(E, \vec{p})$ : "massa—eigentoestanden"  $\nu_1, \nu_2$   
 Zijn  $\nu_1, \nu_2$  identiek aan  $\nu_e, \nu_\mu$ ? In het algemeen: **neen!**

Stel je voor:  $|\nu_e\rangle, |\nu_\mu\rangle$  als quantummechanische superpositie van  $|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle$

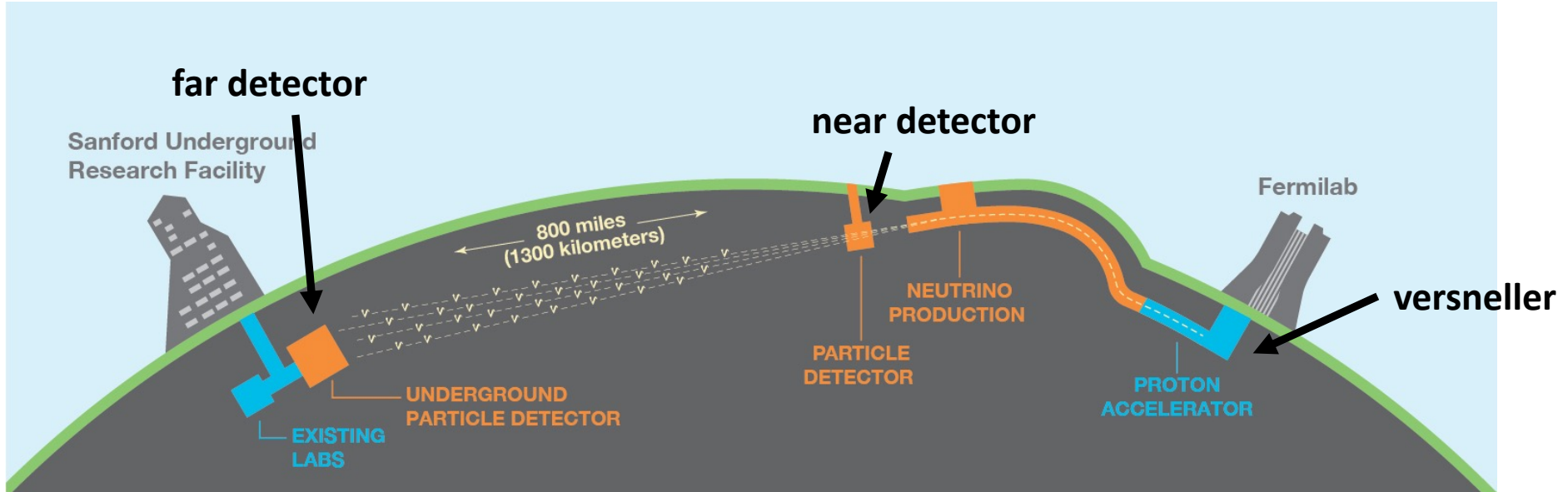


$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}\right)$$

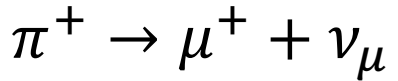
$$\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$$

$$L = ct$$

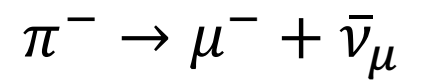
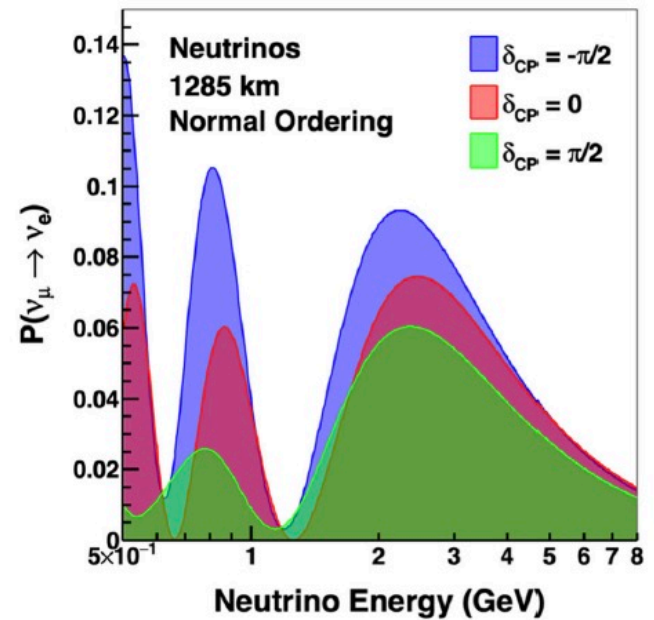
# Deep Underground Neutrino Experiment: oscillaties van versneller-neutrino's



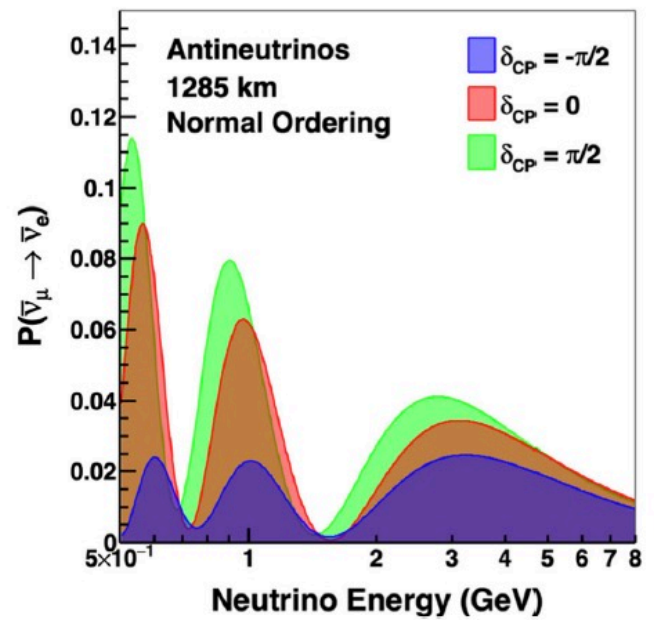
$L = 1300 \text{ km}$   
 $0.5 \text{ GeV} < E < 10 \text{ GeV}$



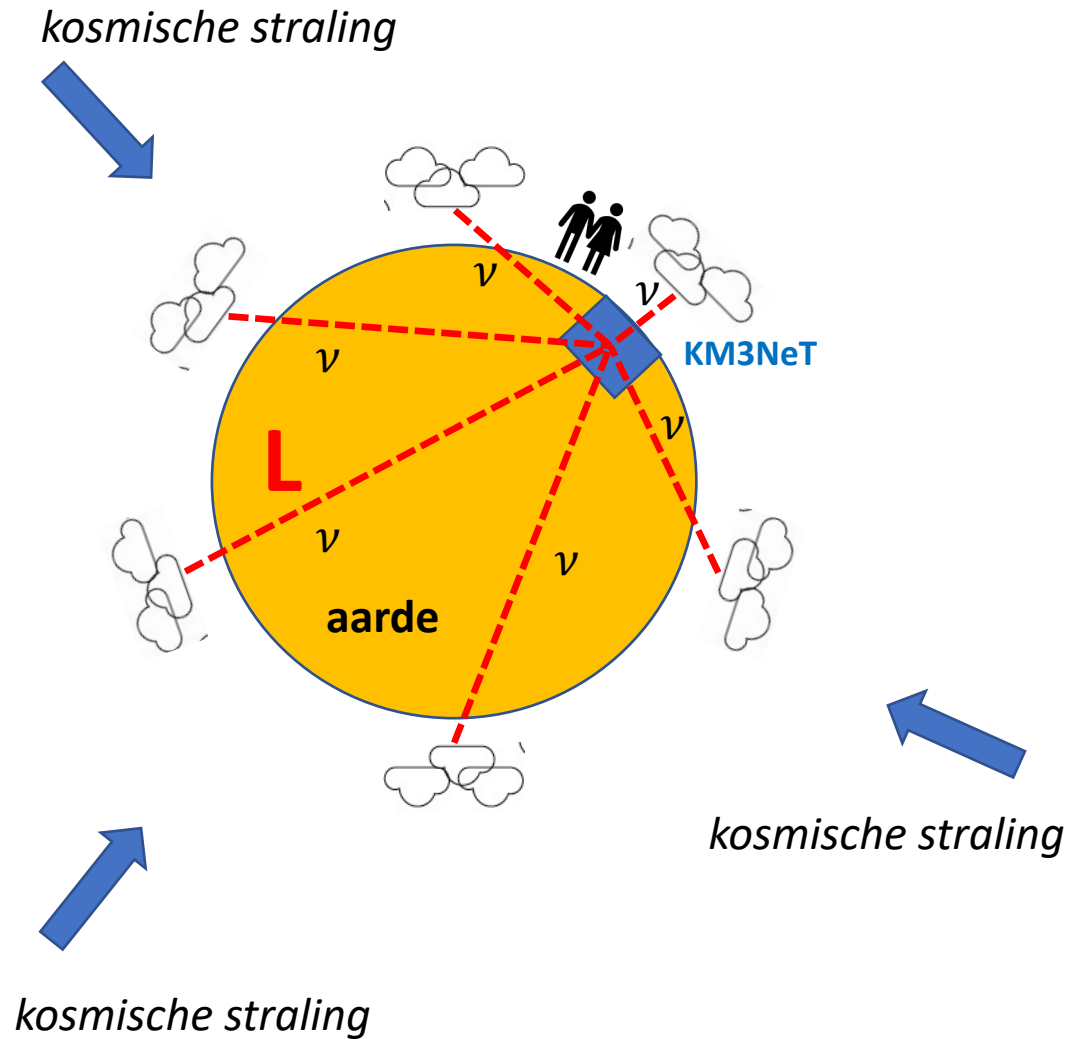
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$$



$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$$

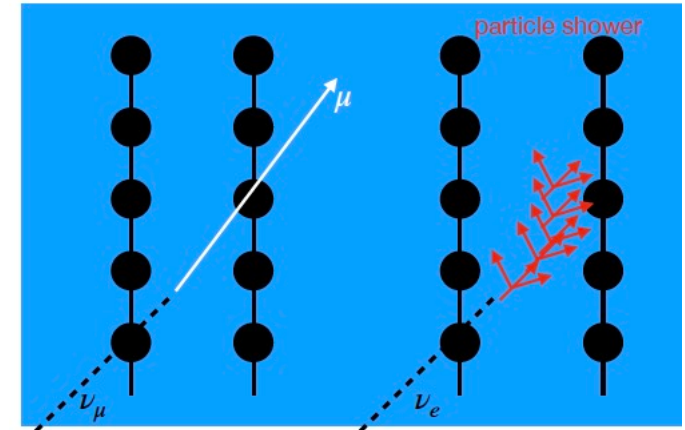


# KM3NeT: atmosferische neutrino's

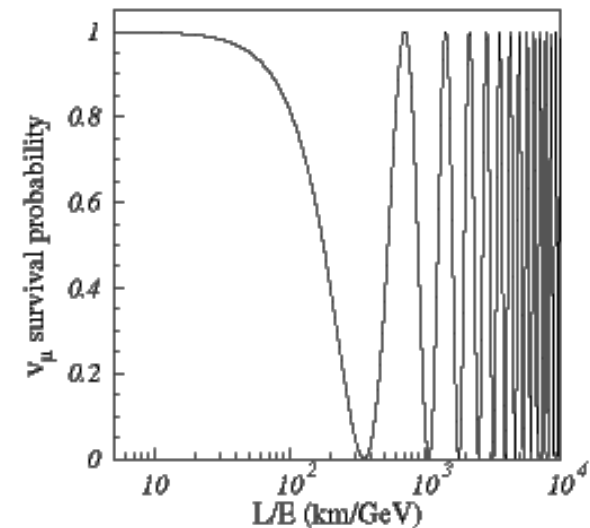


L is variabel, en gecorreleerd aan hoek van inval !

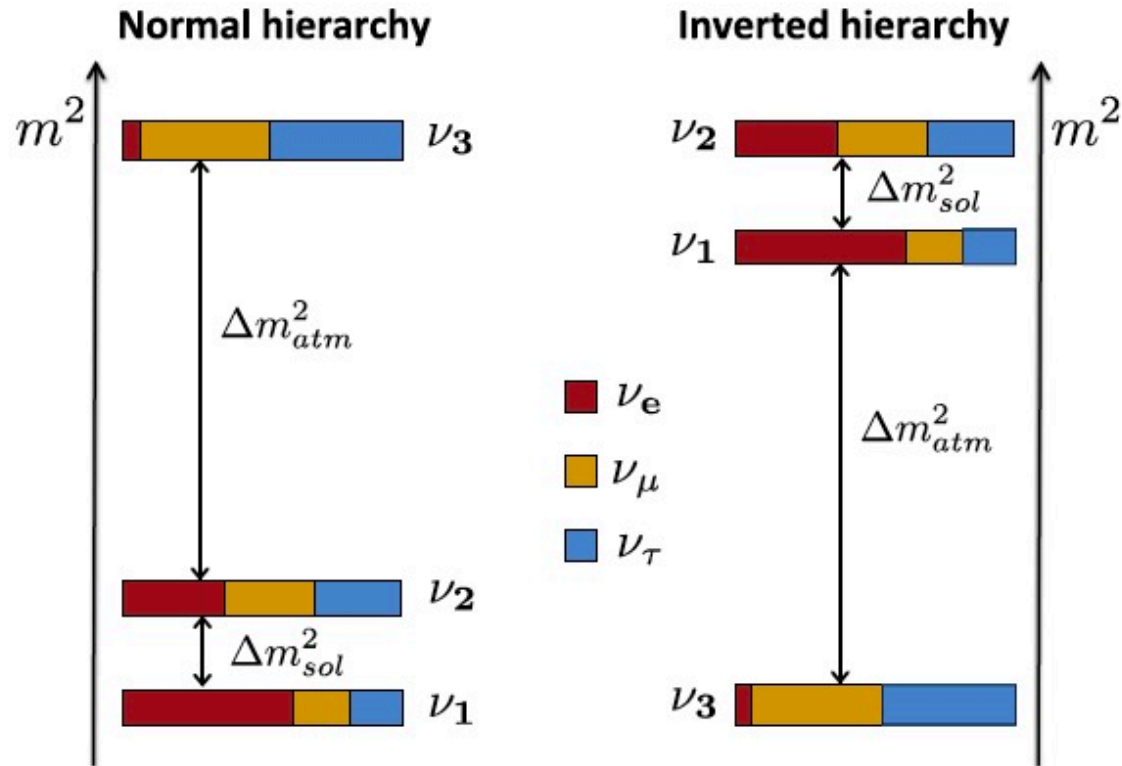
KM3NeT meet Cherenkov licht, uitgezonden door snelle deeltjes in zeewater, afkomstig van neutrino interacties.



Oscillaties: muon neutrino's veranderen in andere types, afhankelijk van  $L/E$  ( $1 \text{ GeV} < E < 50 \text{ GeV}$ )



# Open vragen: 1) wat is de neutrino massa volgorde van 3 neutrino's ?



?

Zowel KM3NeT als DUNE kunnen deze vraag beantwoorden.

Door "matter-effect" in aarde: subtiel verschil in oscillaties tussen normal/inverted hierarchy.

## Open vragen: 2) CP-schending: gedragen antineutrino's zich hetzelfde als neutrino's?

Verklaring materie-antimaterie asymmetrie in het heelal vereist CP-schending.

$CP = \text{lading} \times \text{pariteit}$

Er is een klein beetje CP-schending in het Standaardmodel, maar niet voldoende.

Misschien ligt de oplossing bij neutrino's? ("leptogenese")

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

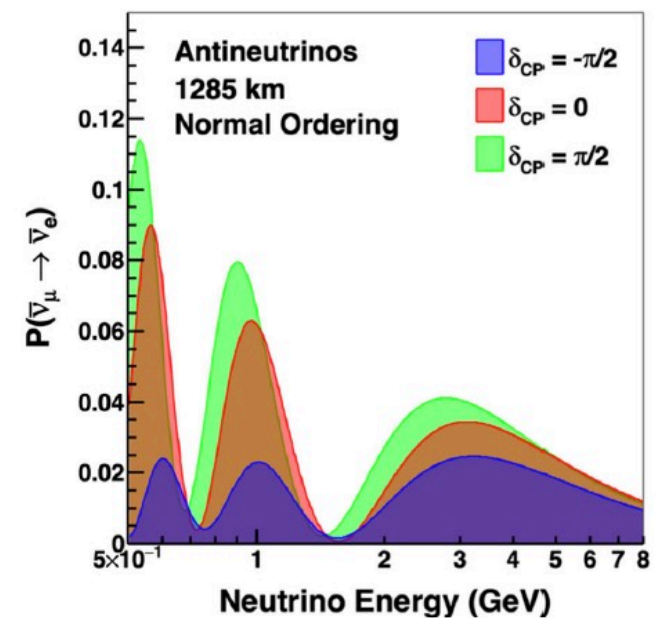
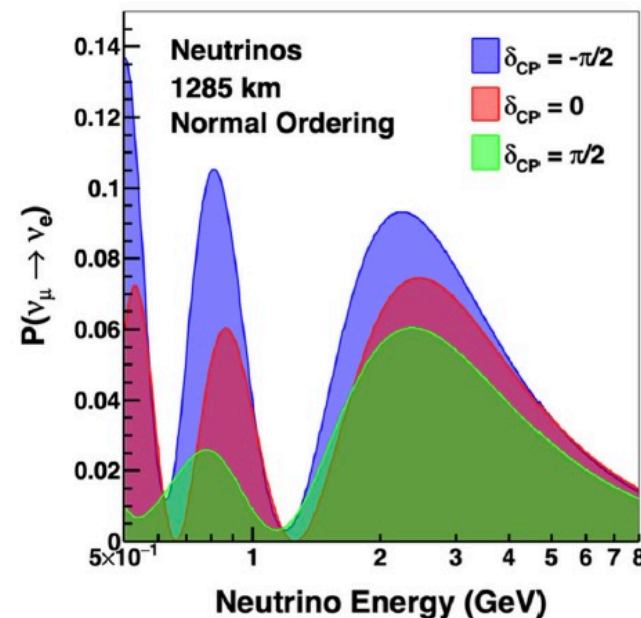
3 neutrino generaties

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

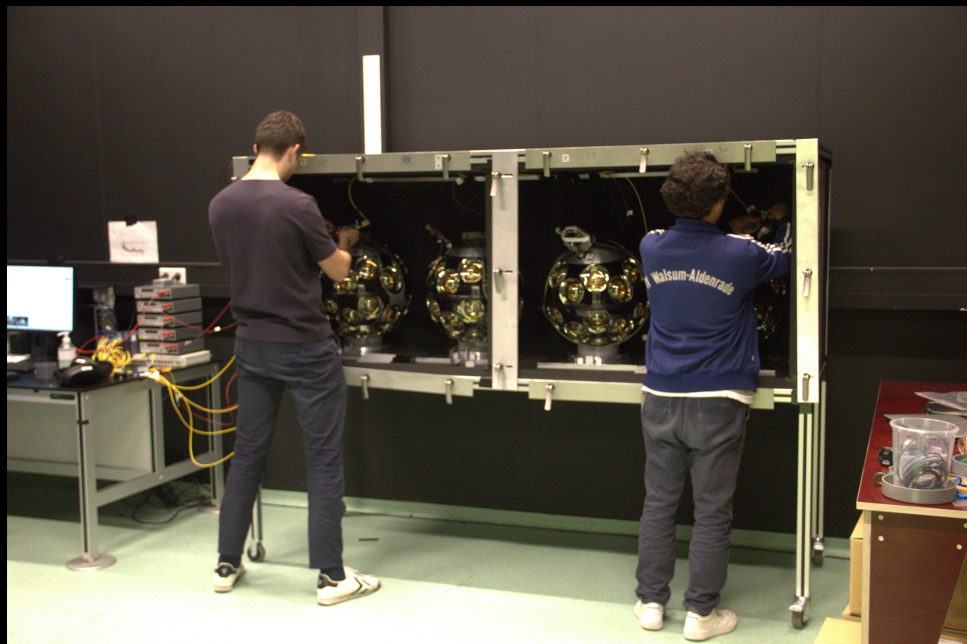
3 menghoeken, en een fase  $\delta$

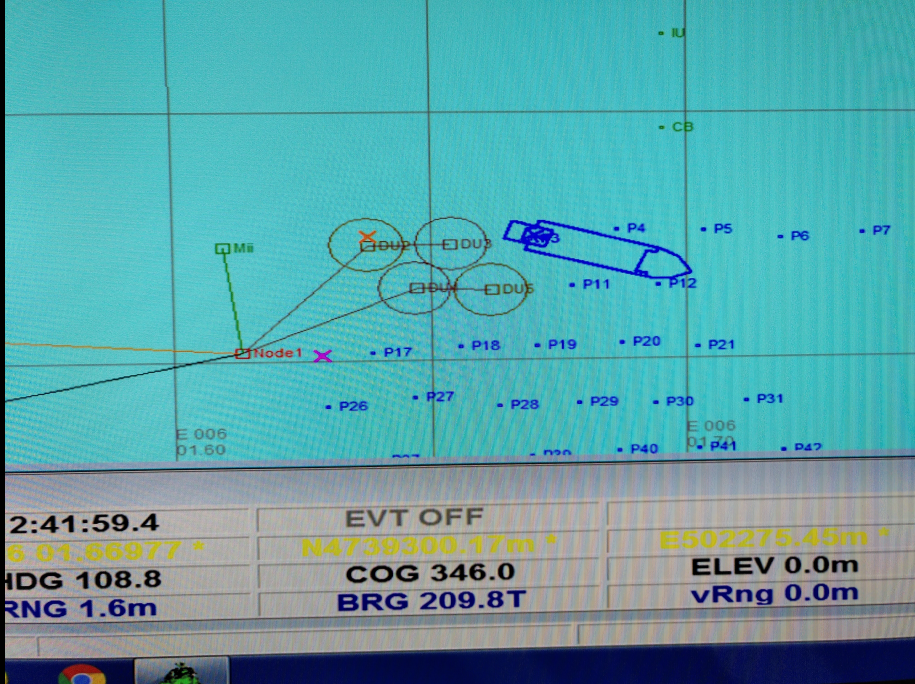
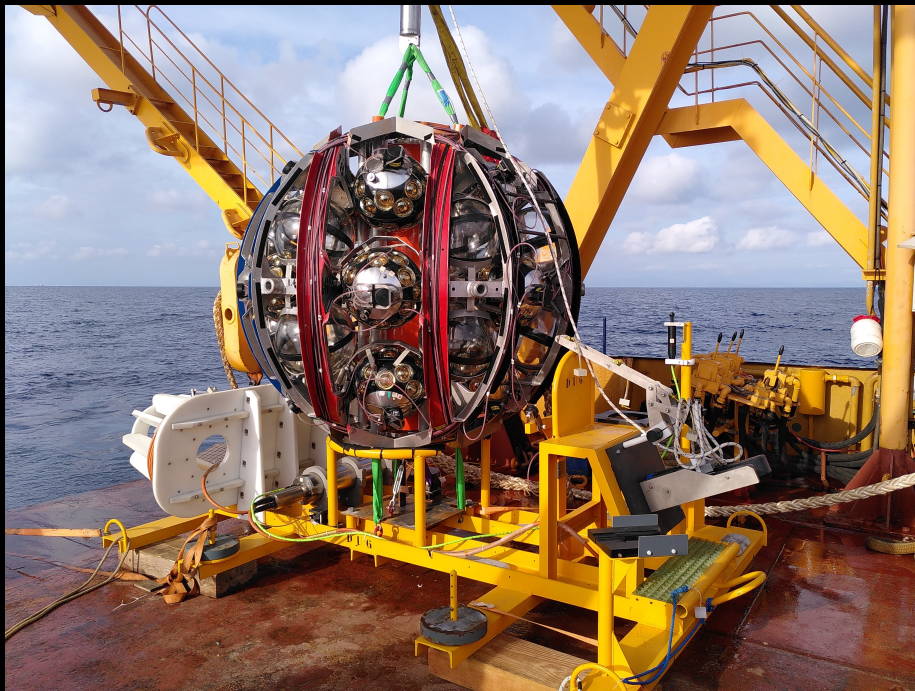
CP-schending!

DUNE kan CP-schending meten



# KM3NeT bouw, o.a. op Nikhef

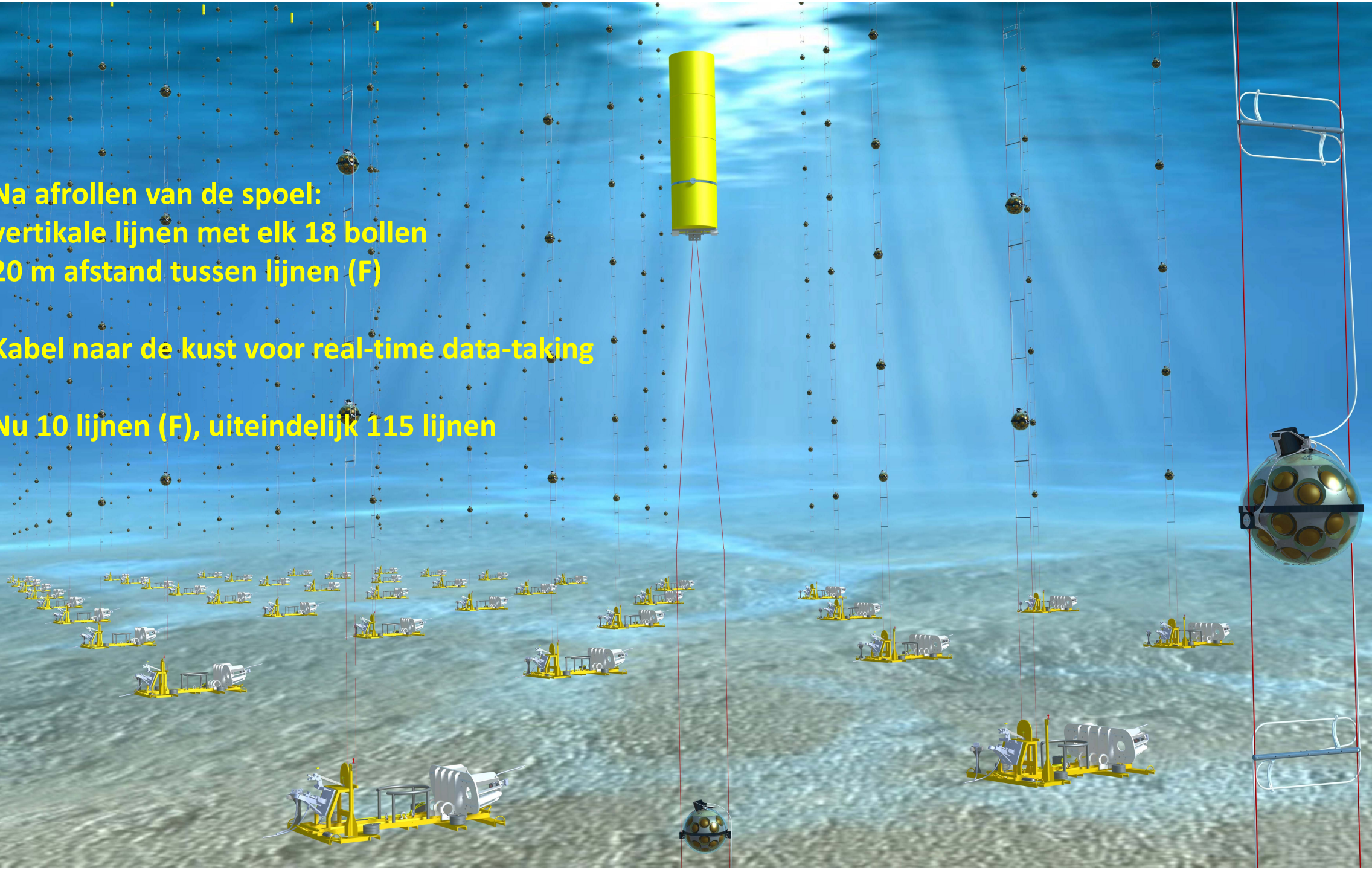




Na afrollen van de spoel:  
vertikale lijnen met elk 18 bollen  
20 m afstand tussen lijnen (F)

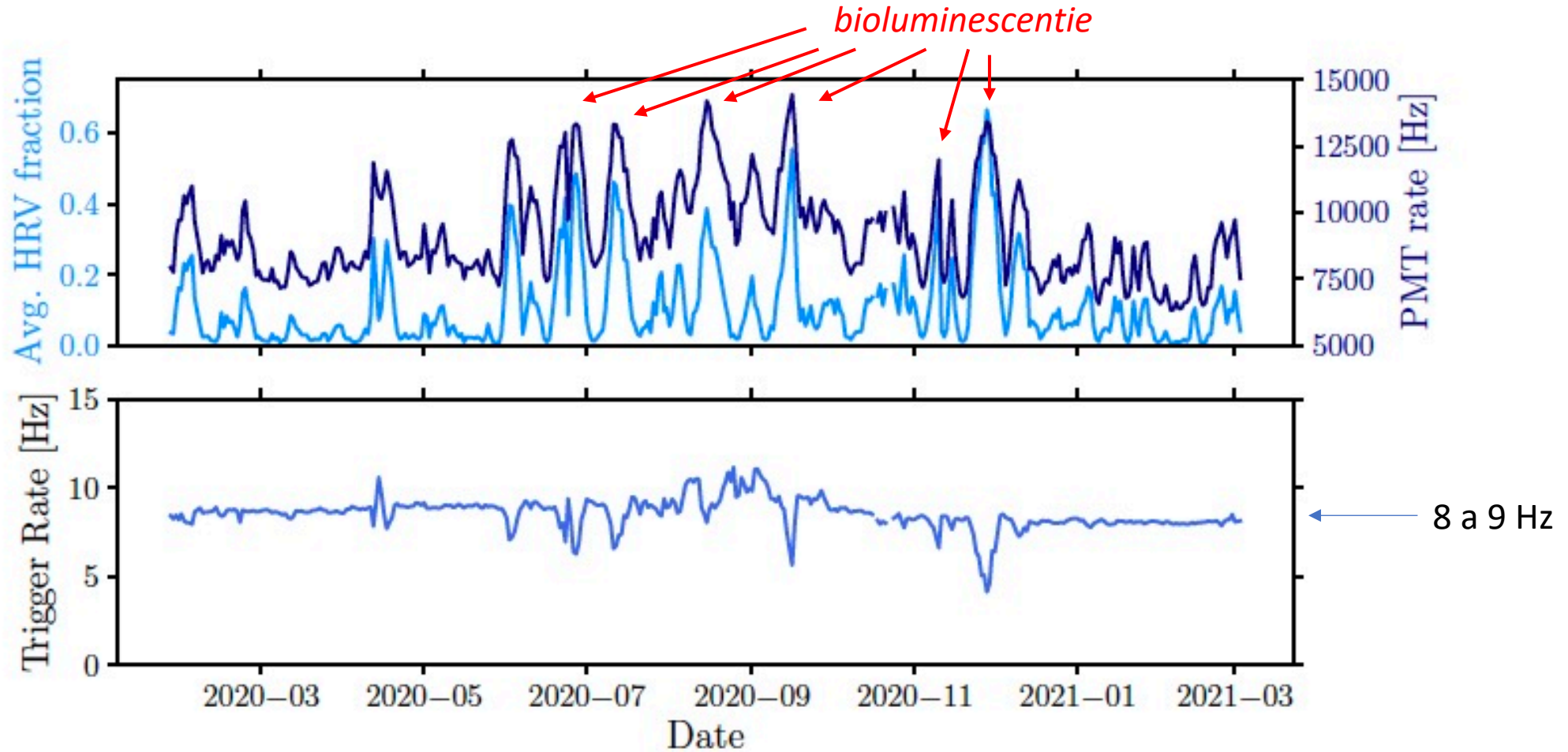
Kabel naar de kust voor real-time data-taking

Nu 10 lijnen (F), uiteindelijk 115 lijnen





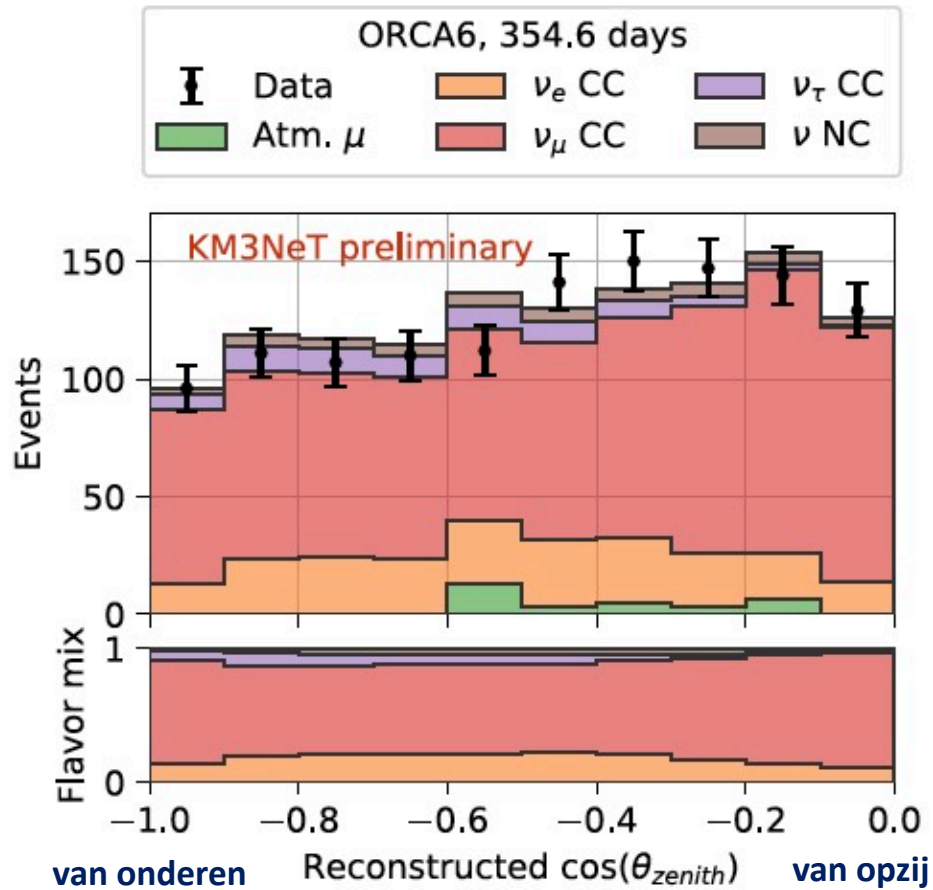
# Data eerste jaar, 6 detectielijnen



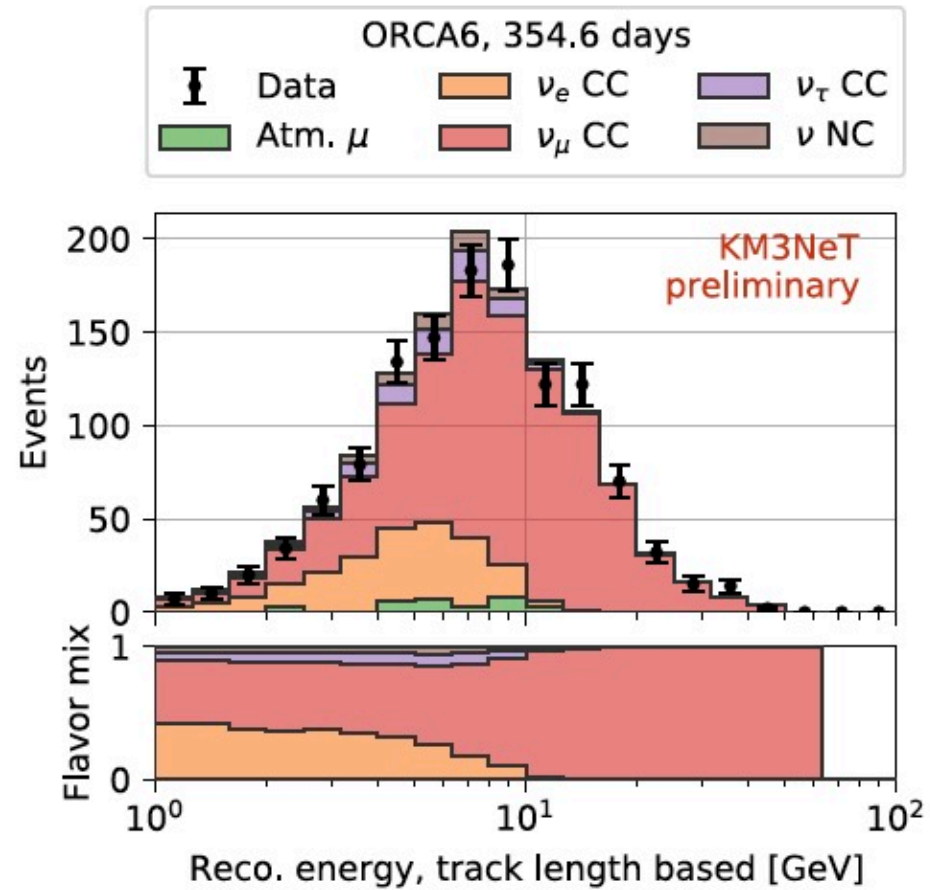
Aantal gedetecteerde events: ~280 miljoen. Meeste events: muonen uit kosmische straling en ruis. Simulatie houdt rekening met tijdsafhankelijke condities (bijv. bioluminescentie).

# Neutrino selectie: (kwaliteit van event-reconstructie, plaats interactiepunt, aantal hits, komend van onderen,...)

## Data eerste jaar, 6 detectielijnen



**Hoek van inval**



**Neutrino energie**

Data: 1237 events

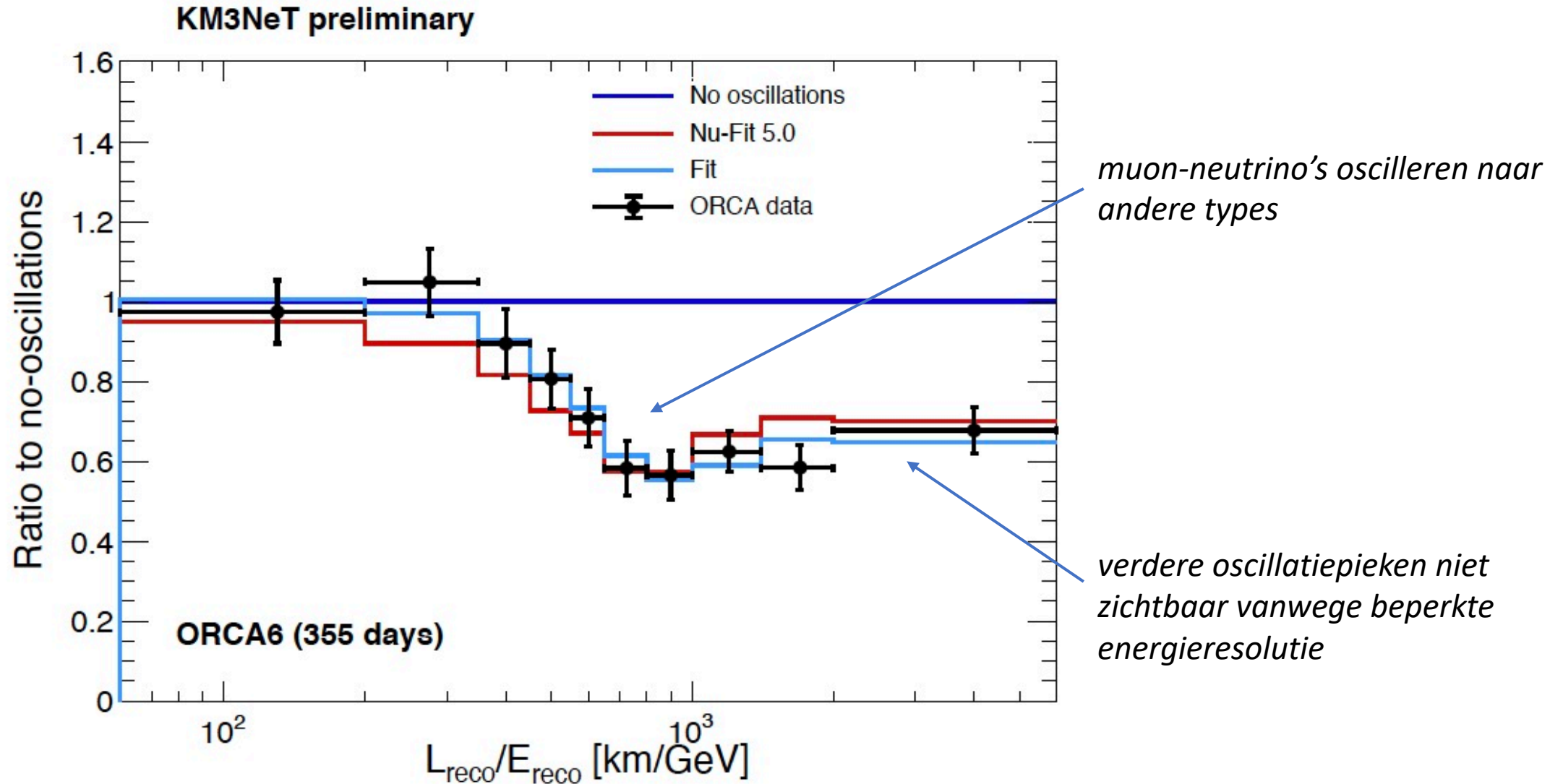
Simulatie:  $1270 \pm 50$  events, signaal/ruis  $\sim 40$

(Simulatie zonder oscillaties:  $\sim 1650$  events)

# Oscillatiepatroon:

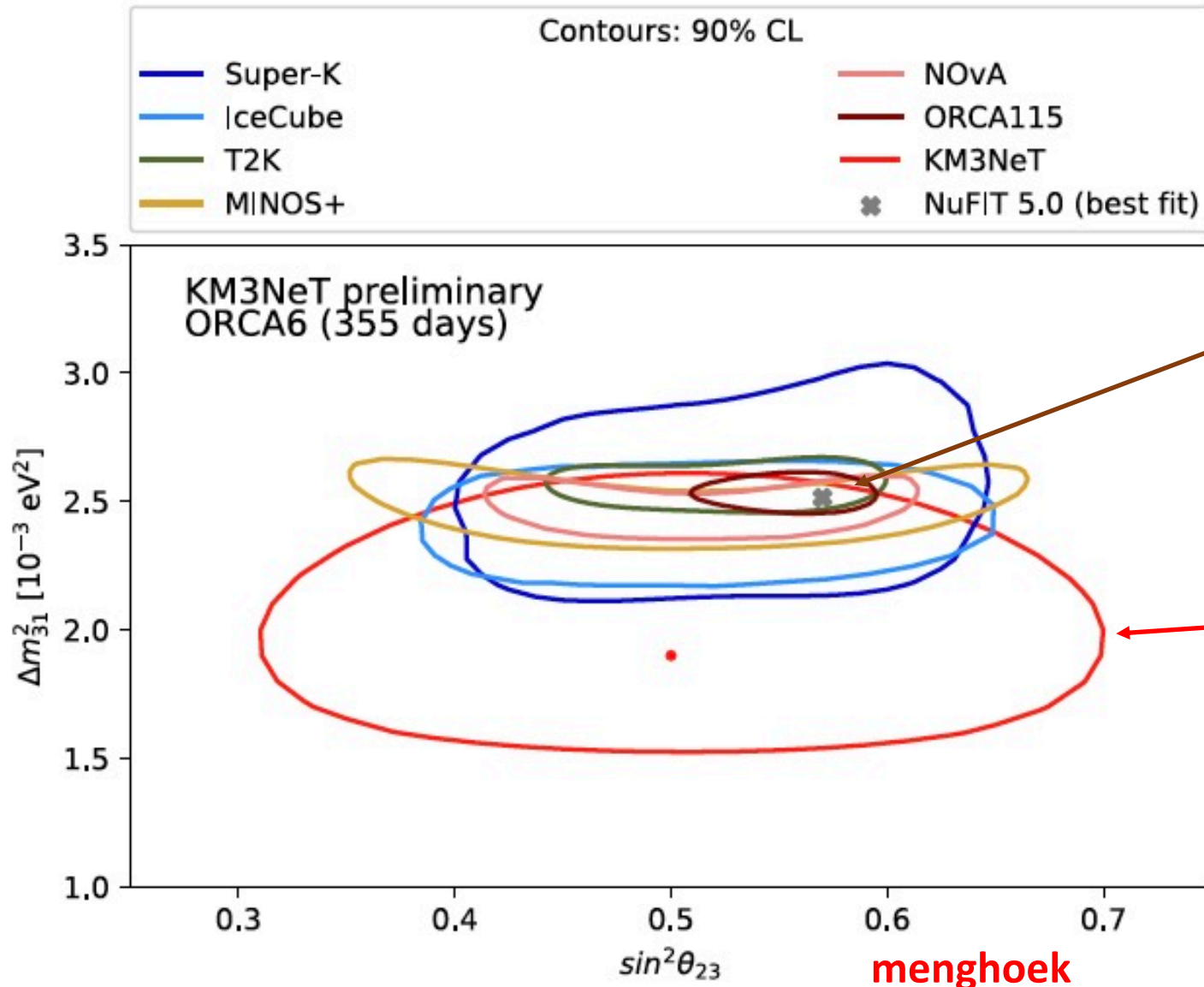
Data eerste jaar, 6 detectielijnen

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2(2\theta)\sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}\right)$$



# Meting van oscillatieparameters: Data eerste jaar, 6 detectielijnen

massaverschil



$$\theta_{23} = 45.4_{-5.7}^{+5.6} \text{ (stat.)} \pm 0.3 \text{ (syst.) [deg]}$$
$$\Delta m_{31}^2 = 1.95_{-0.21}^{+0.24} \text{ (stat.)} \pm 0.17 \text{ (syst.) [} 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{]}$$

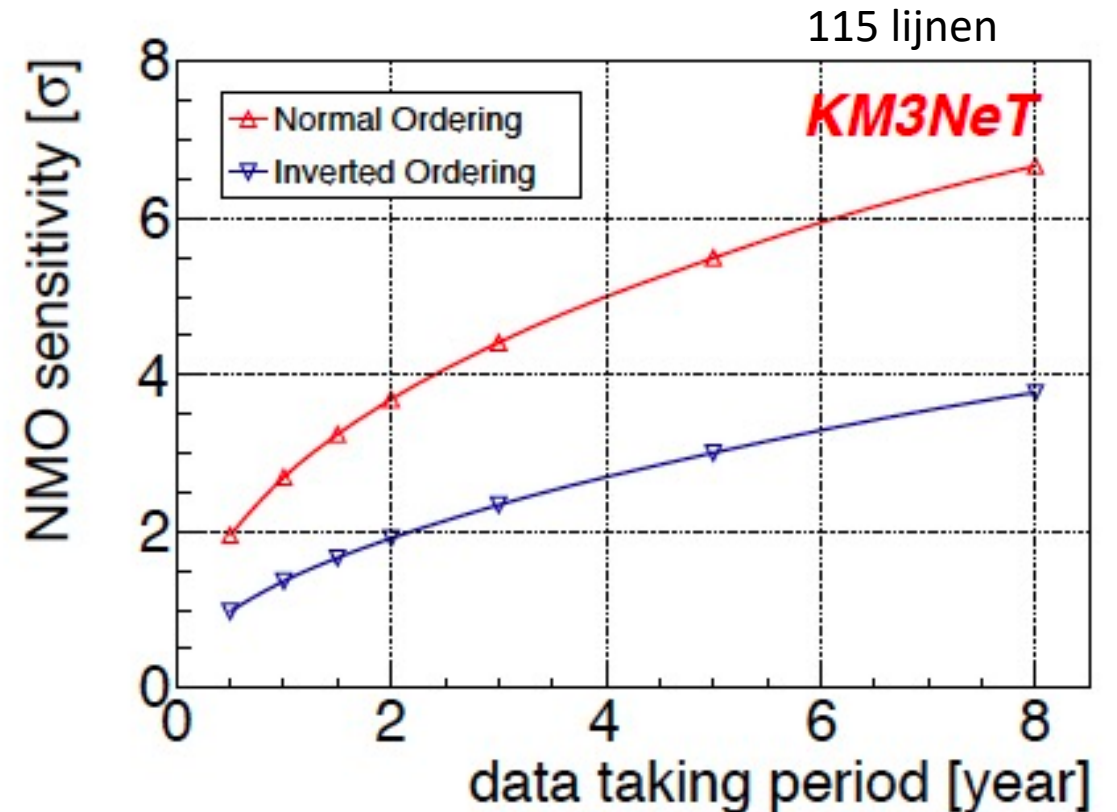
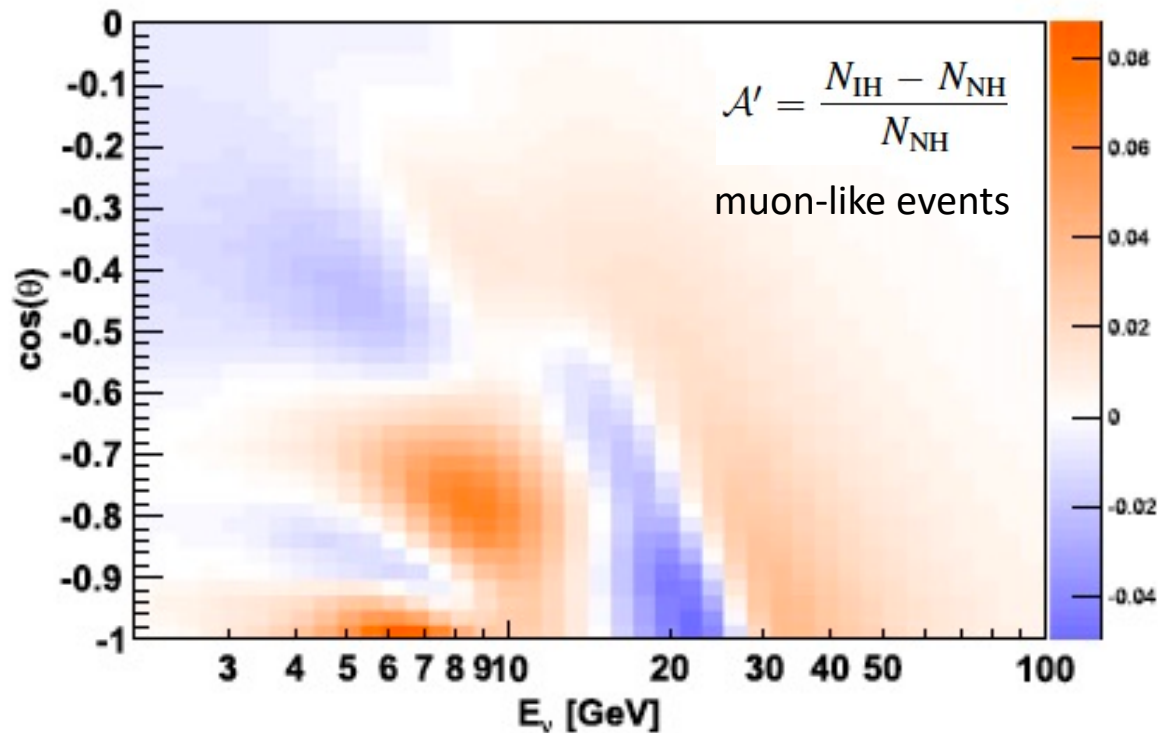
KM3NeT simulatie, 3 jaar, 115 lijnen

KM3NeT 1 jaar, 6 lijnen, data

## KM3NeT plannen:

In 2022 verdubbeling KM3NeT in Franse deel Middellandse Zee tot 20 lijnen.  
Daarna uitbouwen naar 115 lijnen.

*Neutrino massa volgorde meting: subtiel verschil in data tussen normale/inverted hypothese.*  
→ Nog veel meer data nodig.



# DUNE status

2022: Nieuwe hoge-intensiteit protonversneller in aanbouw op Fermilab terrein in Chicago.



South  
Dakota  
1300 km

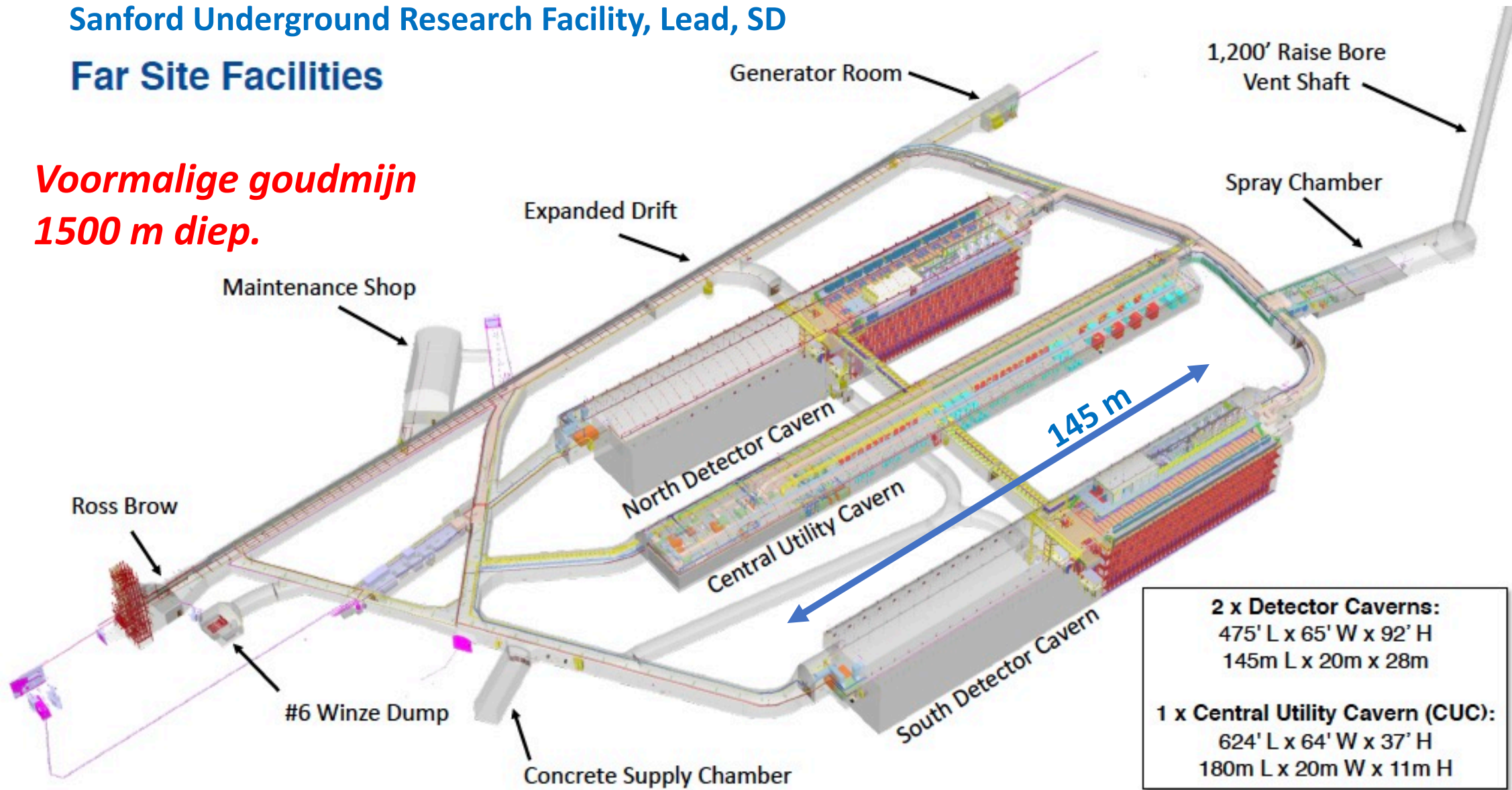
*Sanford Underground Research Facility, Lead, SD*



# Sanford Underground Research Facility, Lead, SD

## Far Site Facilities

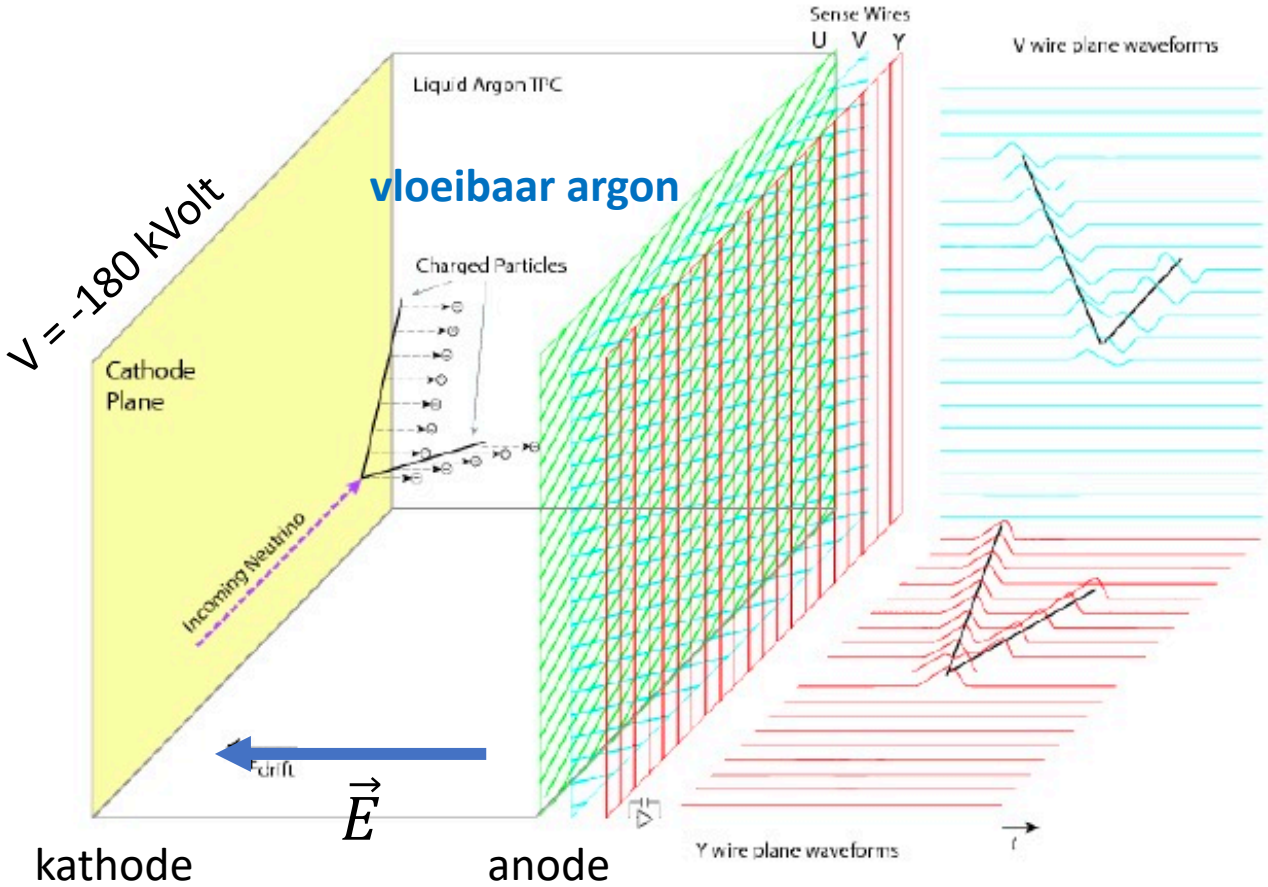
*Voormalige goudmijn  
1500 m diep.*



*In aanbouw: op dit moment 15% uitgegraven*

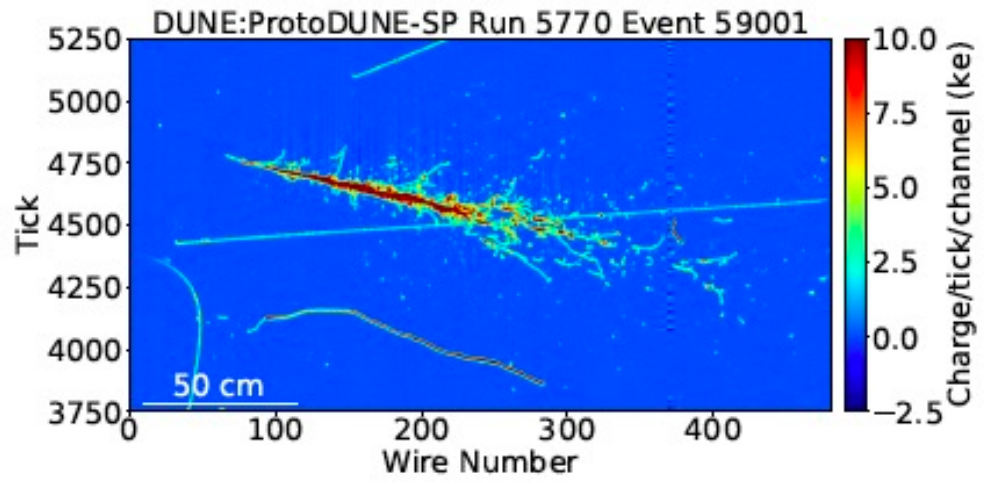


# DUNE detector principe: vloeibaar argon TPC

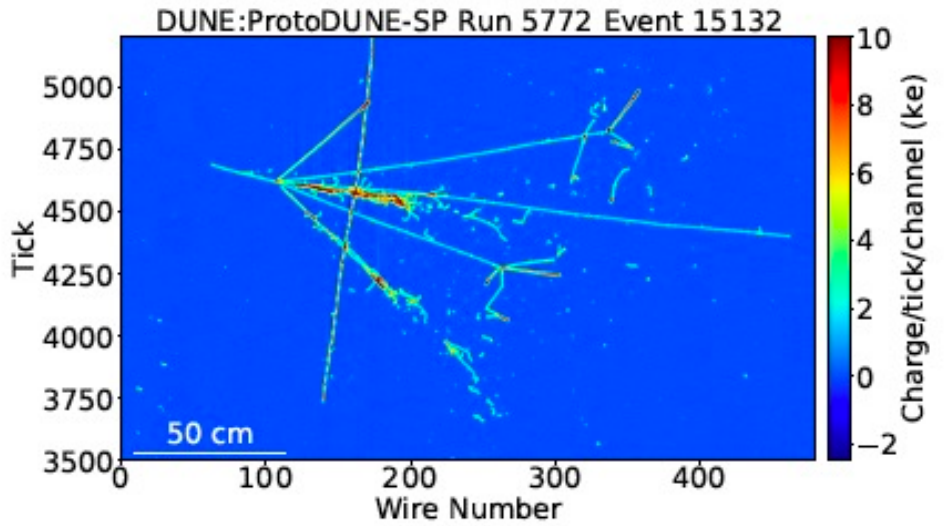


*3-dimensionale foto door patroon van anode-draden plus meten van de drifttijd van vrijgemaakte elektronen*

DUNE uiteindelijk: 4 modules, elk 10000 ton vloeibaar argon



(b) A 6 GeV/c electron candidate.

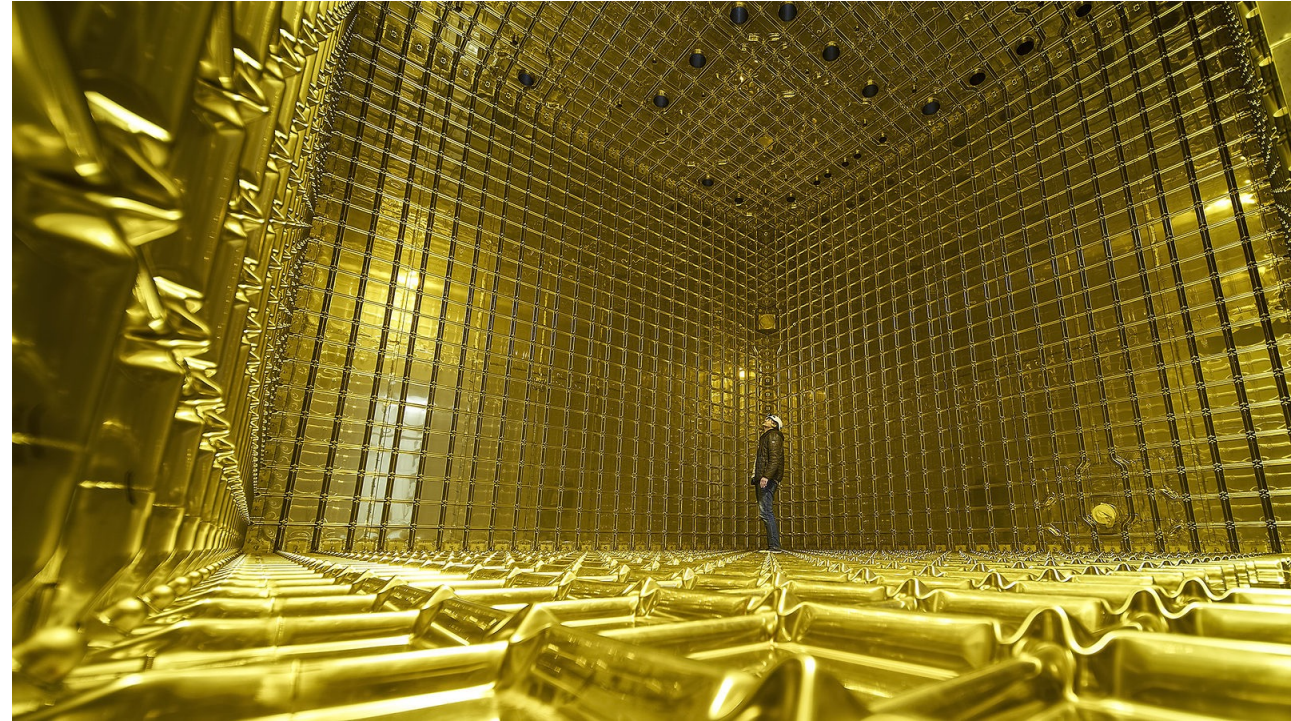


(d) A 6 GeV/c pion candidate.

# ProtoDUNE

DUNE is verreweg de grootste TPC ooit gepland. Eerst maar eens prototypes testen!

*ProtoDUNE: 7 x 7 x 6 m prototype gebouwd op CERN, en getest in testbundel, 2018-2019*



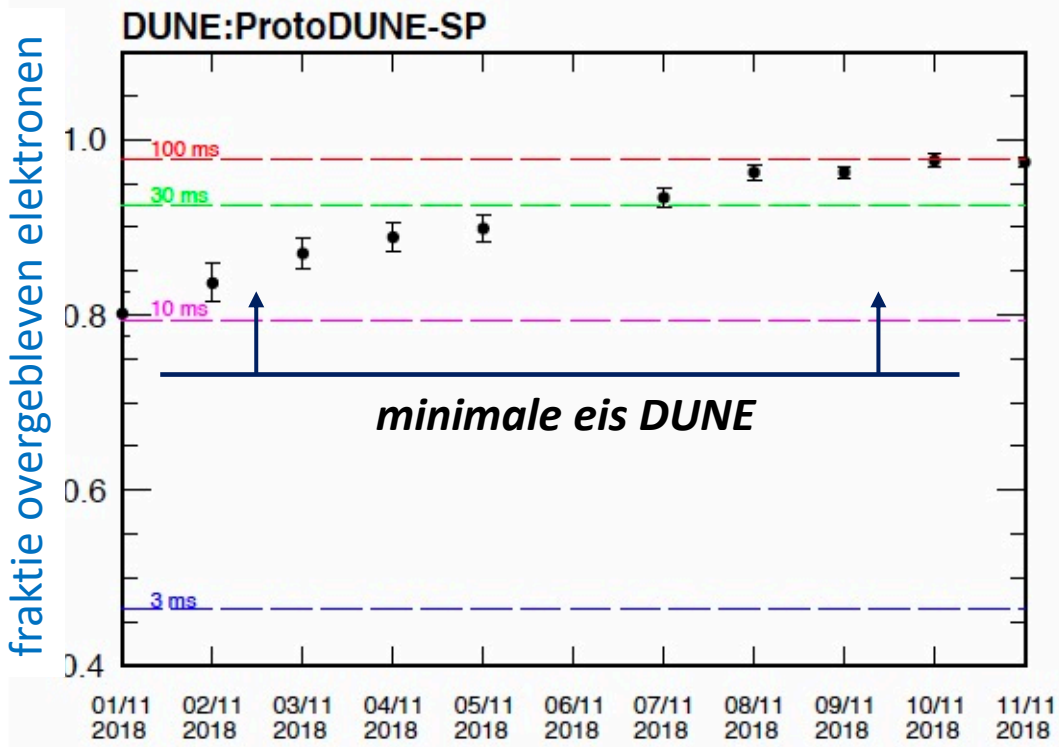
Meest zichtbaar: cryostaat voor 770 ton vloeibaar argon,  $-186\text{ }^{\circ}\text{C}$

Resultaat: het principe werkt!

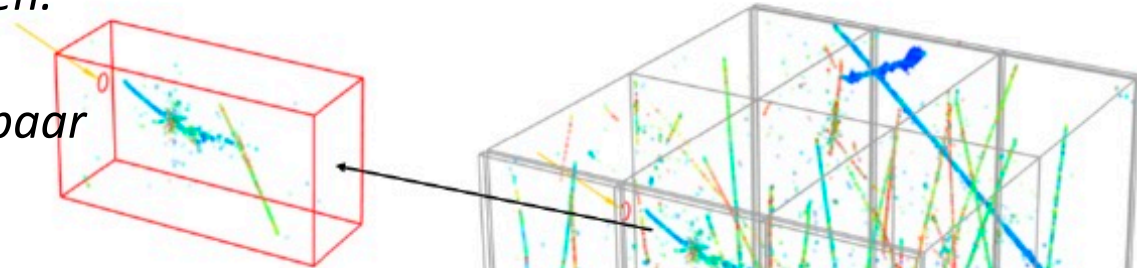
# ProtoDUNE electron "lifetime"

*Electron drift naar anode maximaal 8 ms.  
Verontreinigingen in argon absorberen elektronen.*

*ProtoDUNE: schoon! Drifttijden tot 100 ms haalbaar*



# Kosmische stralen in ProtoDUNE



Run: 5145  
Event: 26918  
Beam momentum: 7GeV  
10 Oct 2018 22:57:33 (GMT)



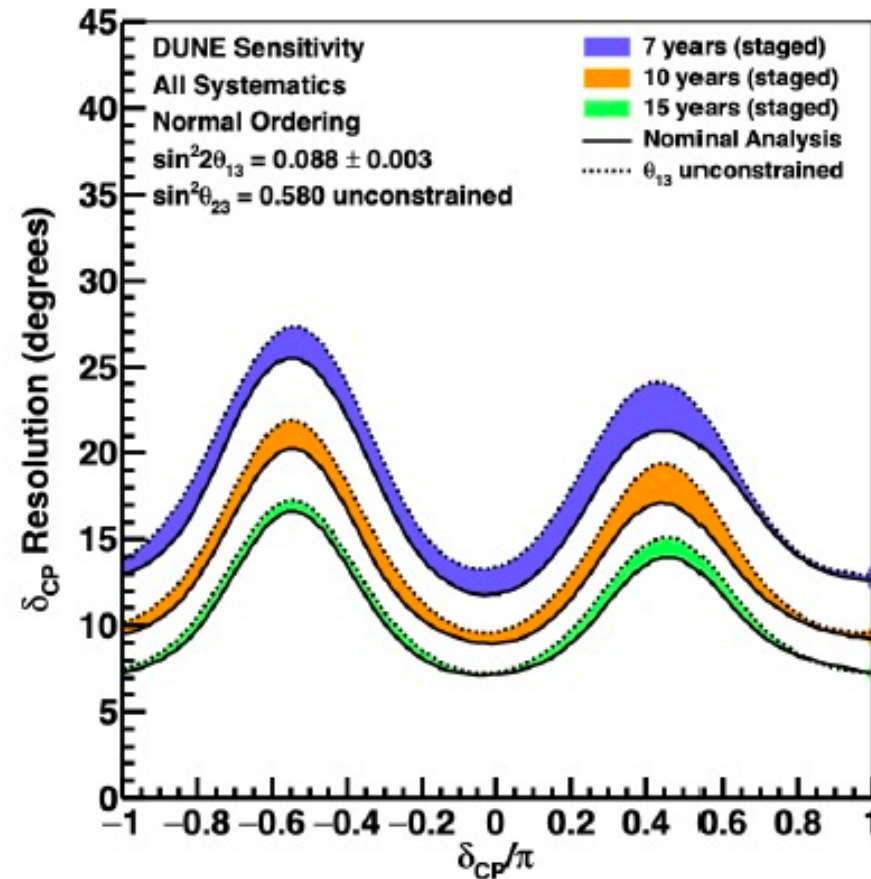
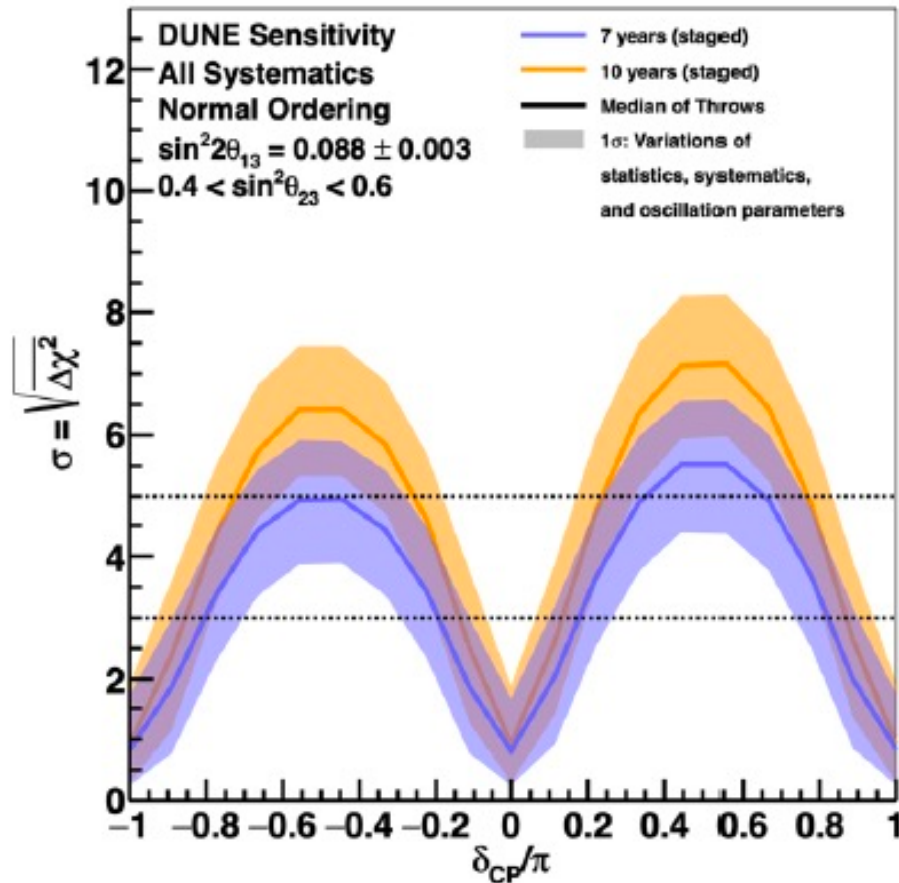
*Sporen in een tijdvenster van 5 ms...*

# DUNE plannen

Tweede run ProtoDUNE 2022-2023 op CERN  
Voltooiing eerste DUNE module (10000 ton) 2026  
Neutrino bundel vanaf Fermilab 2029

Doel: ontdekking CP-schending in neutrino's!

gevoeligheid voor  $\delta \neq 0$



# Conclusie

Nieuwe, grote infrastructuur voor neutrino oscillatie metingen is in aanbouw!

Nu al: precisie-metingen van oscillatieparameters.

Vergelijking van massa-smaak mixing met die in de quark-sector: input voor theoriemodellen.

Dan: eerste bepaling van de neutrino massa volgorde.

Dan: ontdekking CP-schending in neutrino's?

Nieuwe fysica? Steriele neutrino's? Non-standard neutrino interacties?



## International Masterclasses

18<sup>th</sup> International Masterclasses 2022



15 maart 2022

13:00-17:00

Meer informatie:

[jberger@nikhef.nl](mailto:jberger@nikhef.nl)

Each year more than 13.000 high school students in [60](#) countries come to one of about 225 nearby universities or research centres for one day in order to unravel the mysteries of particle physics. Lectures from active scientists give insight in topics and methods of basic research at the fundamentals of matter and forces, enabling the students to perform measurements on real data from particle physics experiments themselves. At the end of each day, like in an international research collaboration, the participants join in a video conference for discussion and combination of their results. See [here](#) for media coverage. **International Masterclasses 2022** will take place from 24.2. - 9.4.2022.

*Aanmelden:*

<https://www.nikhef.nl/inschrijving-international-masterclass-2022/>