

Физика нейтрино – передний край науки

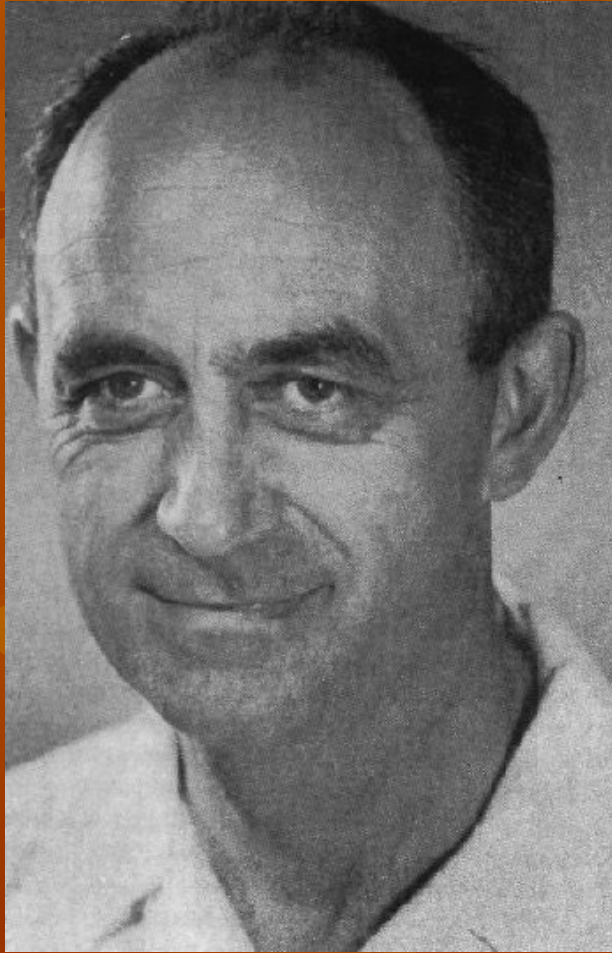


Е.В. Широков, IX летняя школа учителей физики, 25 июня 2019 г.



Полкило нейтрино?
Да я даже не знаю,
сколько весит одно!

Гипотеза нейтрино (1930 г.)



Энрико Ферми



Вольфганг Паули



Бруно Понтекорво

Малая вероятность
= большой объём
регистрирующего
вещества

Регистрация (анти)нейтрино (1956 г.)



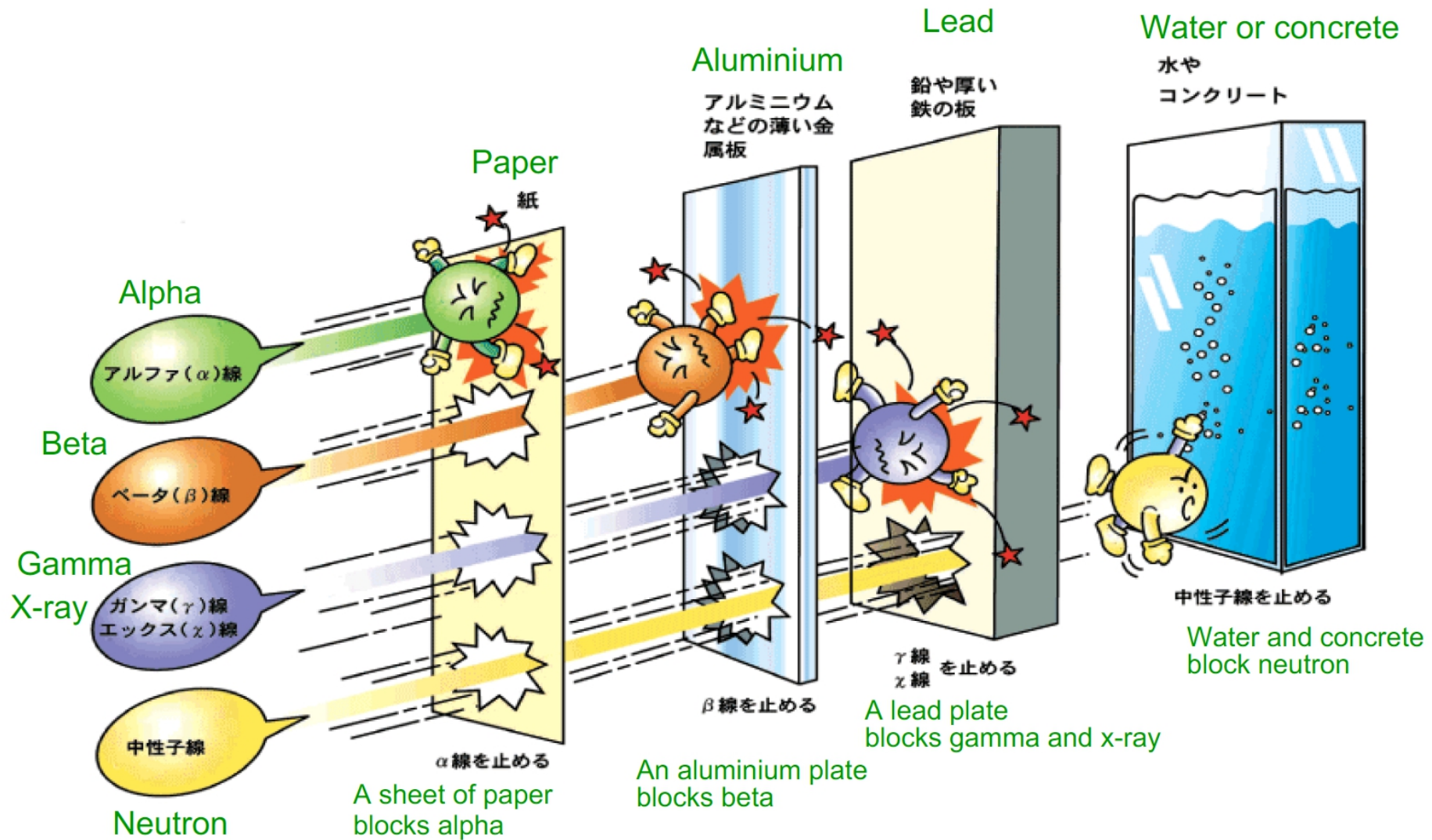
Ф.Райнес (Нобелевская премия 1995 г.)



К.Коуэн

«Ароматы» нейтрино

- $n \rightarrow p + e^{-} + \nu_e$
- $\mu^{-} \rightarrow e^{-} + \nu_{\mu} + \nu_e$ (1962 г.)
- $\tau^{-} \rightarrow \mu^{-} + \nu_{\tau} + \nu_{\mu}$ (1975 г.)



Muon Spectrometer

Muon

Neutrino

Hadronic Calorimeter

Proton

Neutron

The dashed tracks are invisible to the detector

Electromagnetic Calorimeter

Electron

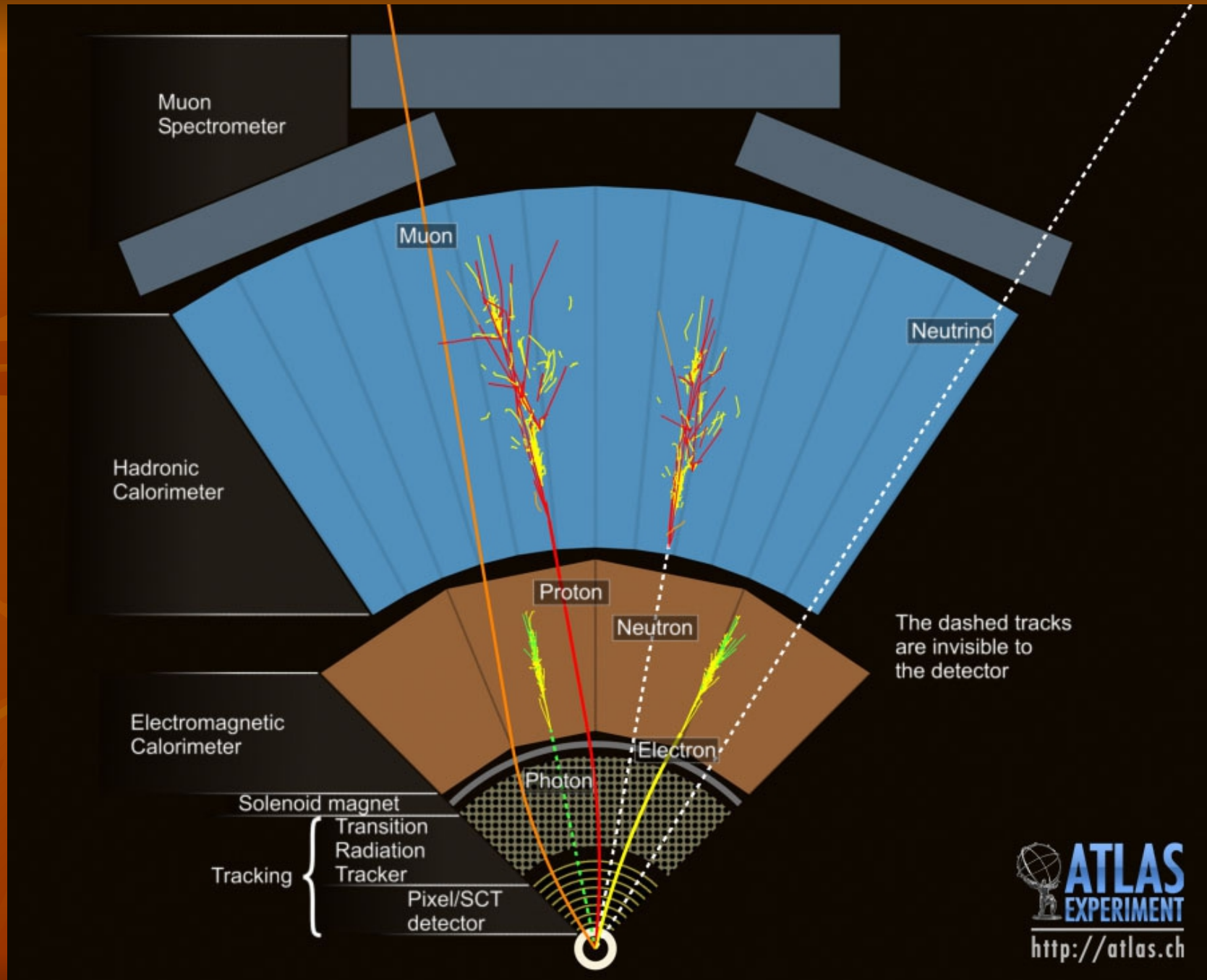
Photon

Solenoid magnet

Tracking

Transition Radiation Tracker

Pixel/SCT detector



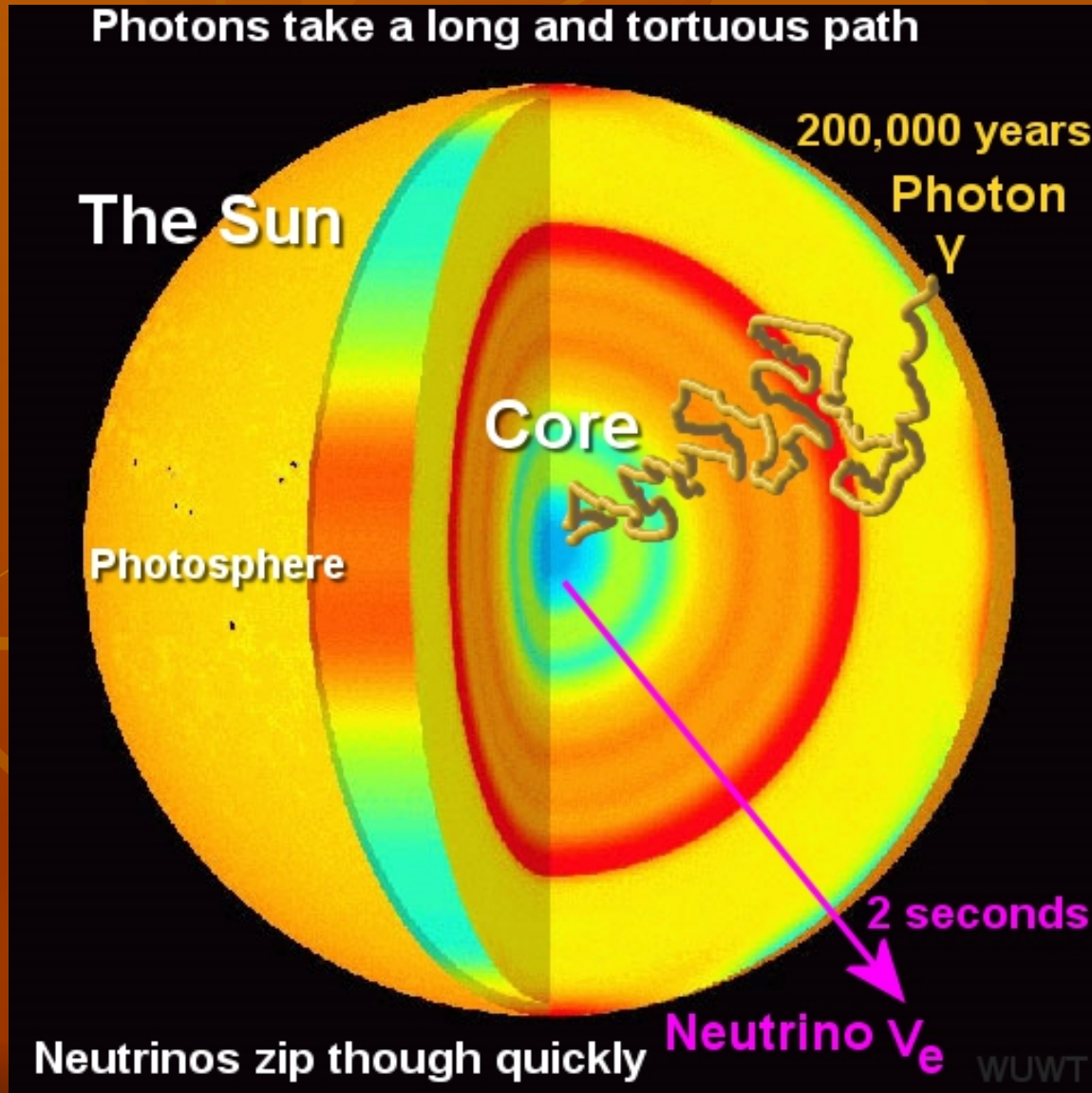
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Взаимодействие	Квант	Радиус (см)	Квадрат константы	Пример
Сильное	глюоны	$\sim 10^{-13}$	~ 1	Ядро, адроны
Электромагнитн.	γ -квант	∞	$\alpha_e = 1/137$ $\approx 10^{-2}$	Атом
Слабое	W^+, W^-, Z^0	$\sim 10^{-16}$	$\sim 10^{-6}$	β -распад
Гравитационное	?	∞	$\sim 10^{-40}$	Сила тяжести

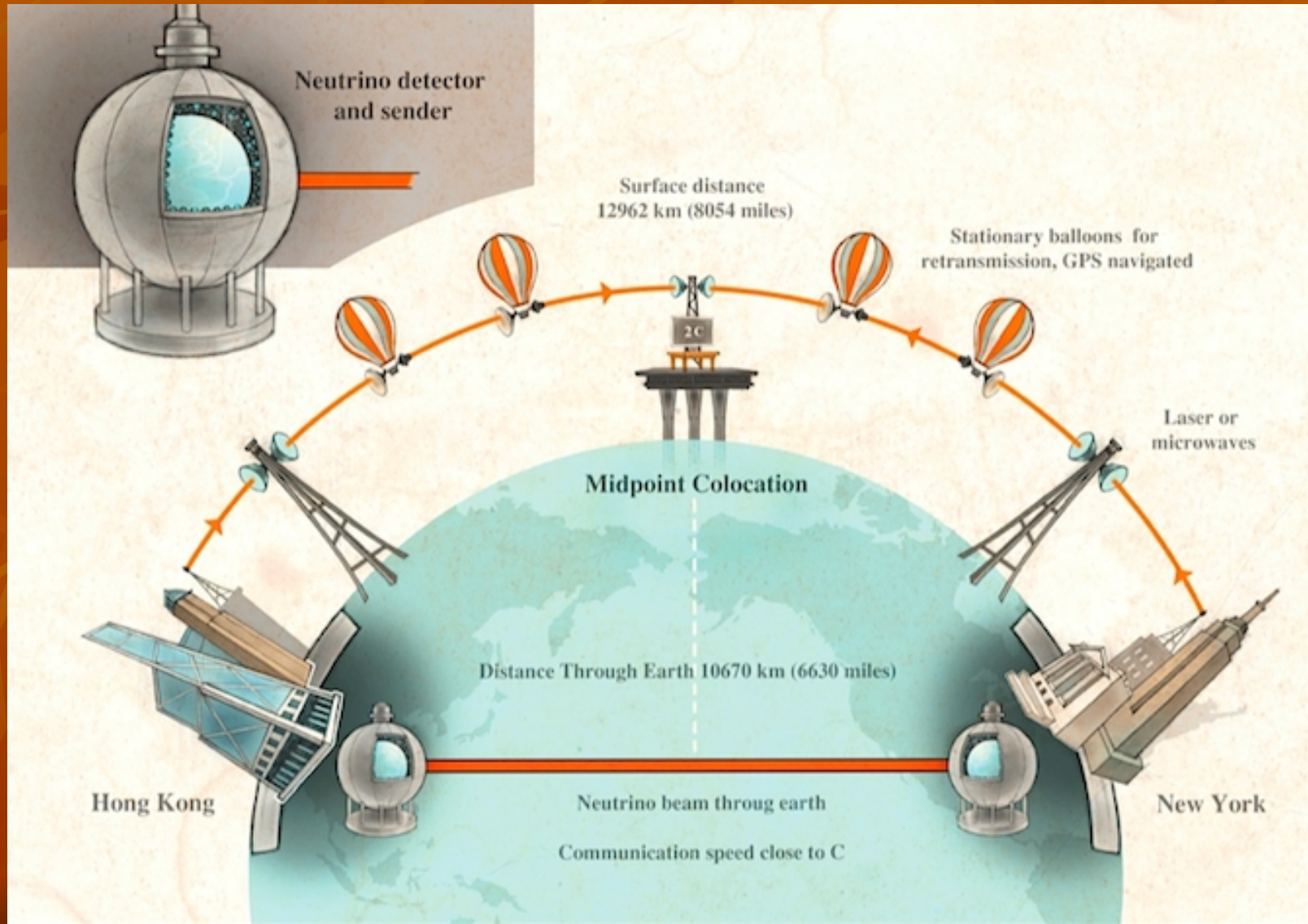
Главная особенность

- Чрезвычайно малая вероятность взаимодействия с веществом. Нейтрино способно проходить в относительно плотной среде космические расстояния, не взаимодействуя.

Исследование Солнца

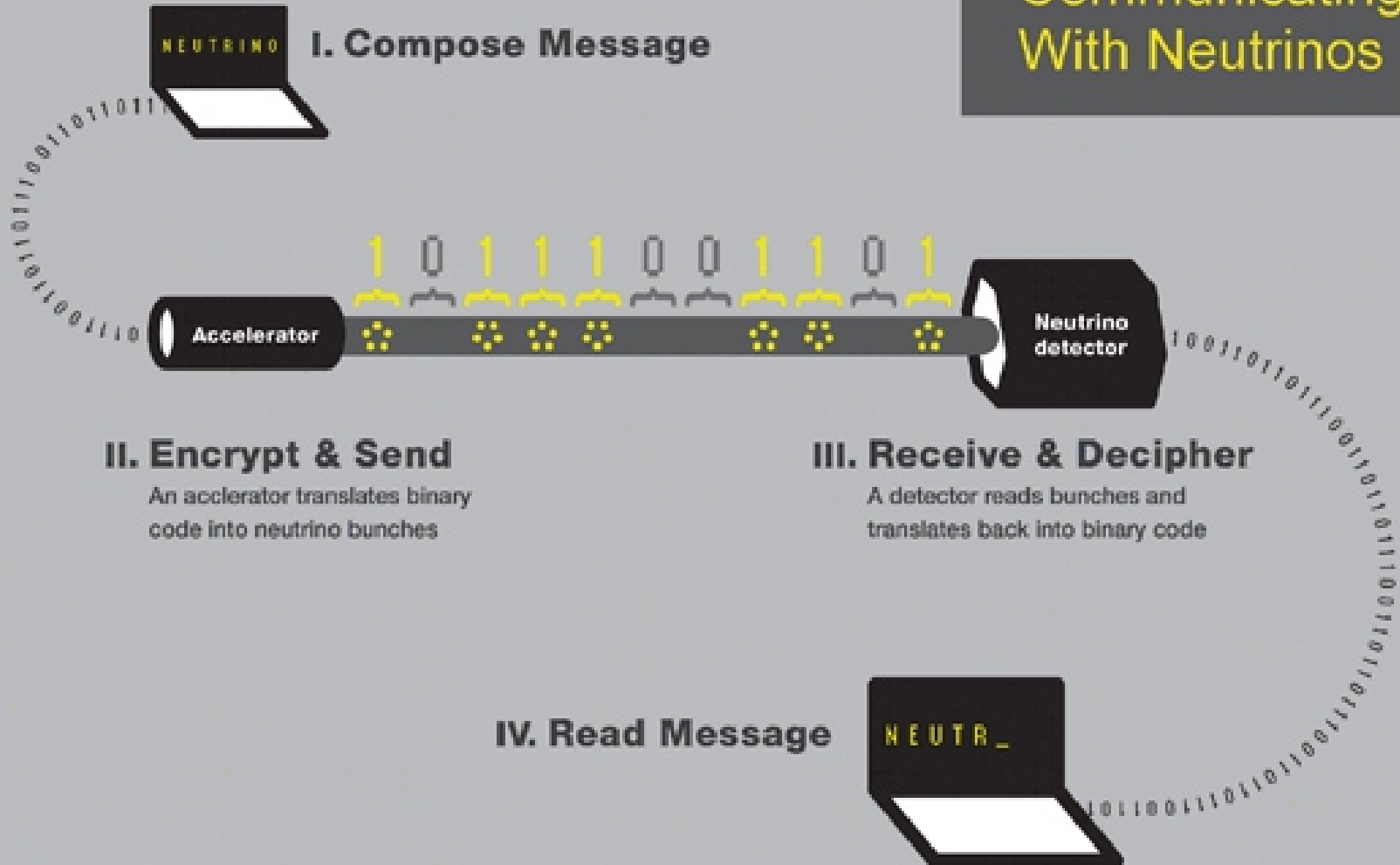


Средство связи?

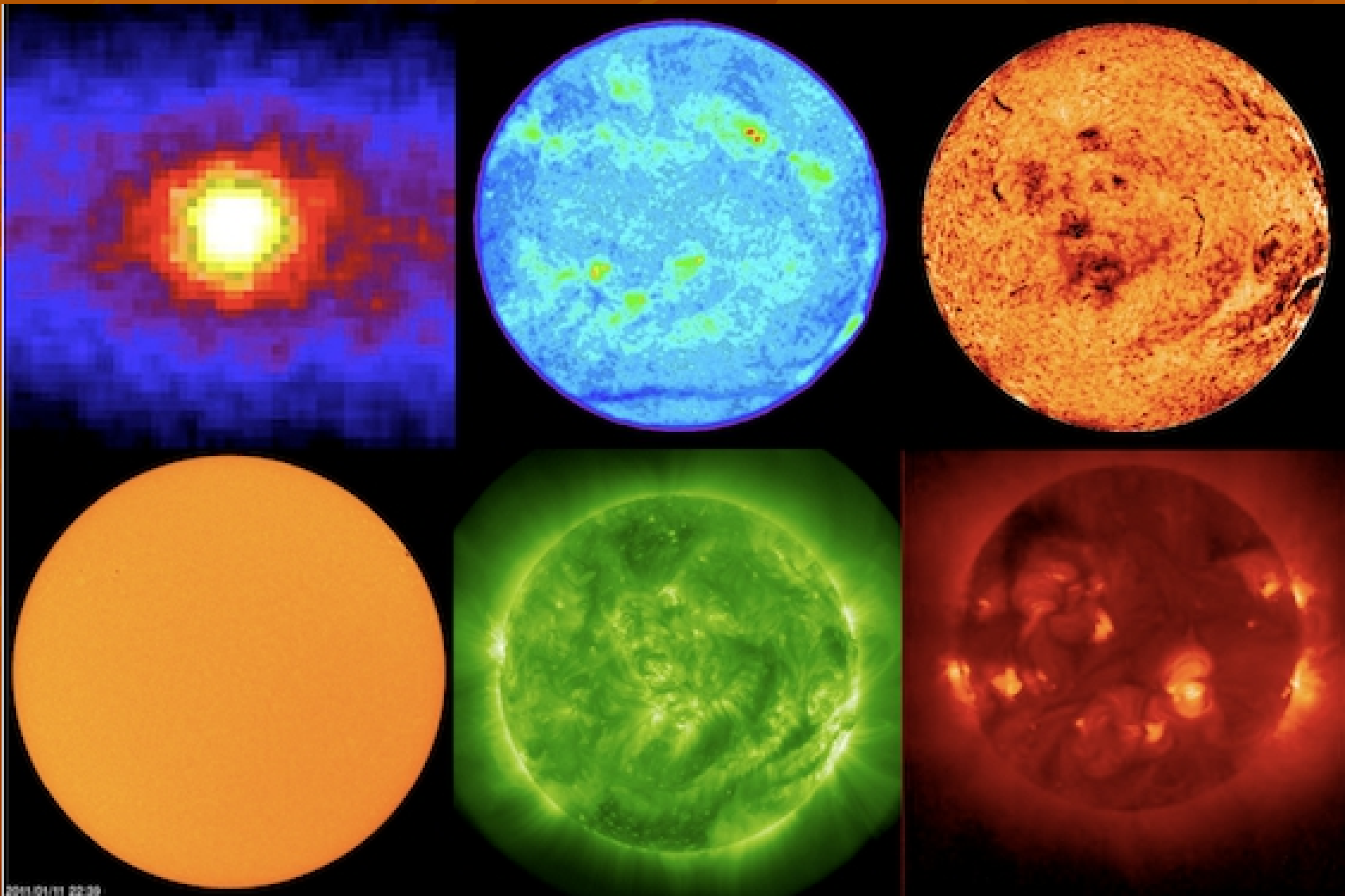


Первая передача информации по «нейтринному лучу» (Рочестер, Сев.Каролина, март 2012 г.)

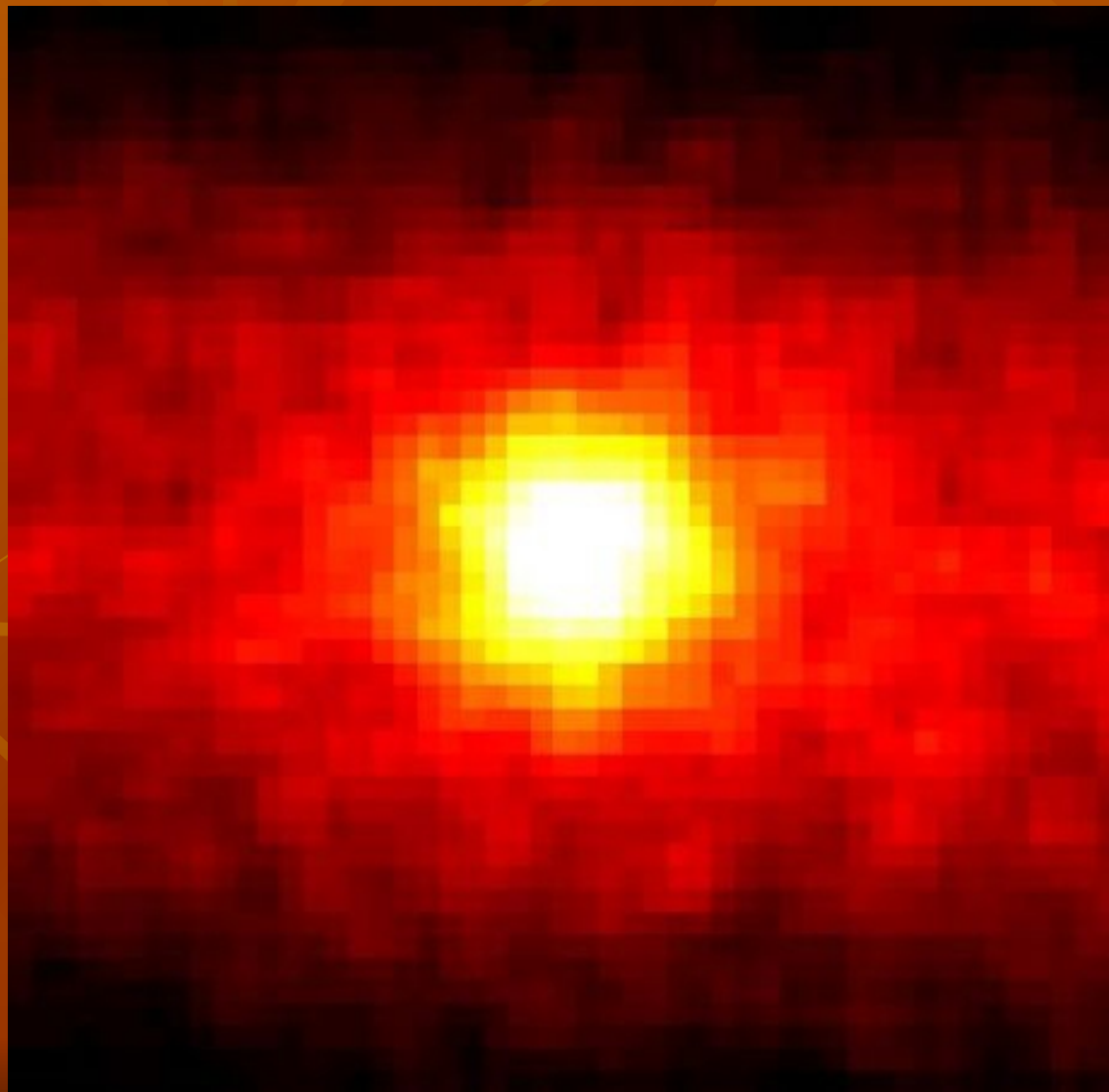
Communicating With Neutrinos



Солнечные «портреты»



Солнце в «нейтринном свете»



Малое количество
данных



Большое количество
данных



Как же изучать нейтрино?

- 1) Изменить вероятность взаимодействия?
- 2) Найти вещества с высокой вероятностью взаимодействия?
- 3) Увеличивать объёмы регистрирующих установок?

Основные направления в экспериментальной физике нейтрино

- Масса нейтрино
- Нейтринные осцилляции
- Эффективная регистрация
нейтрино для всех диапазонов
энергии

Проект КАТРИН



Нейтринные осцилляции

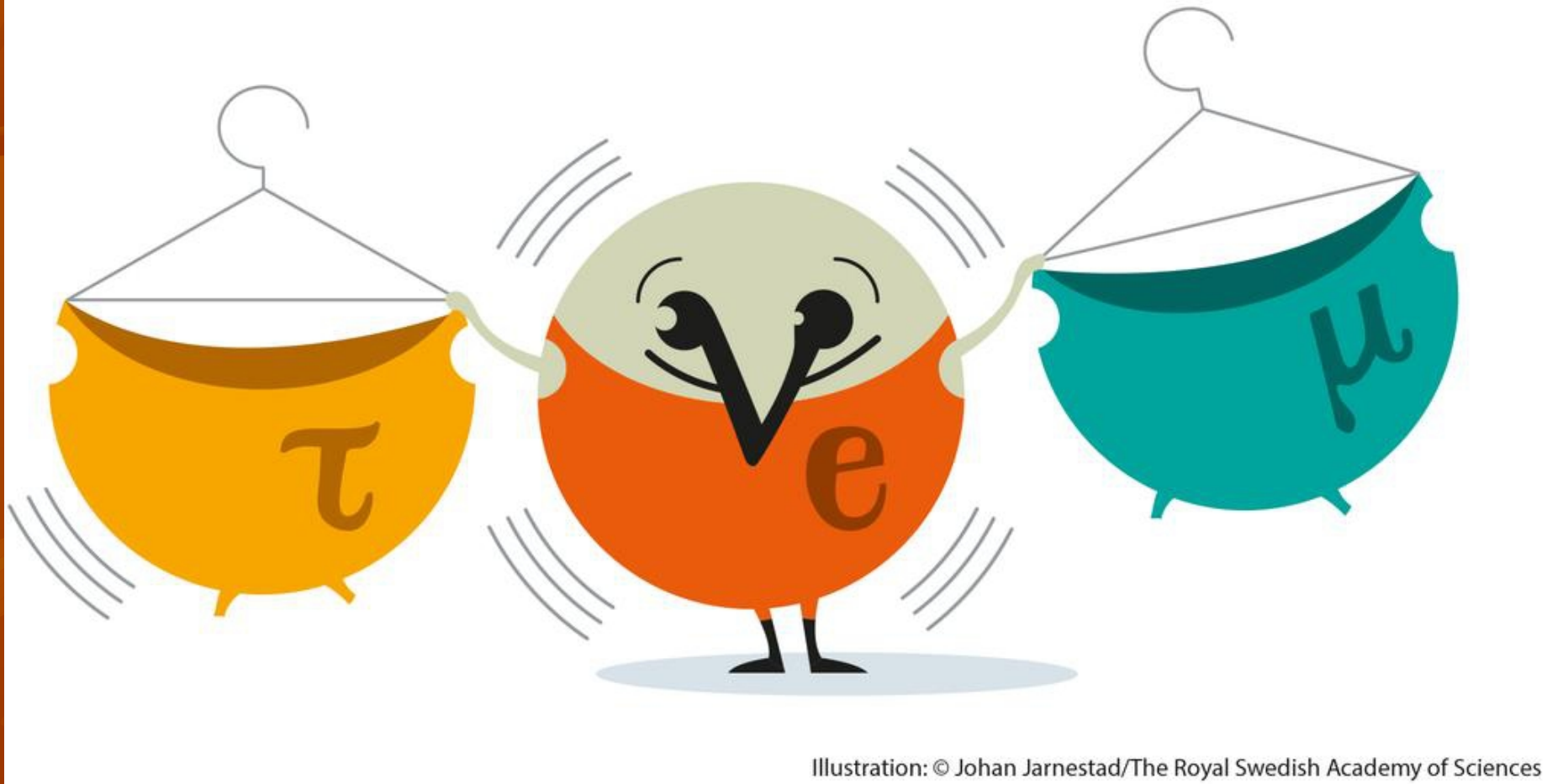
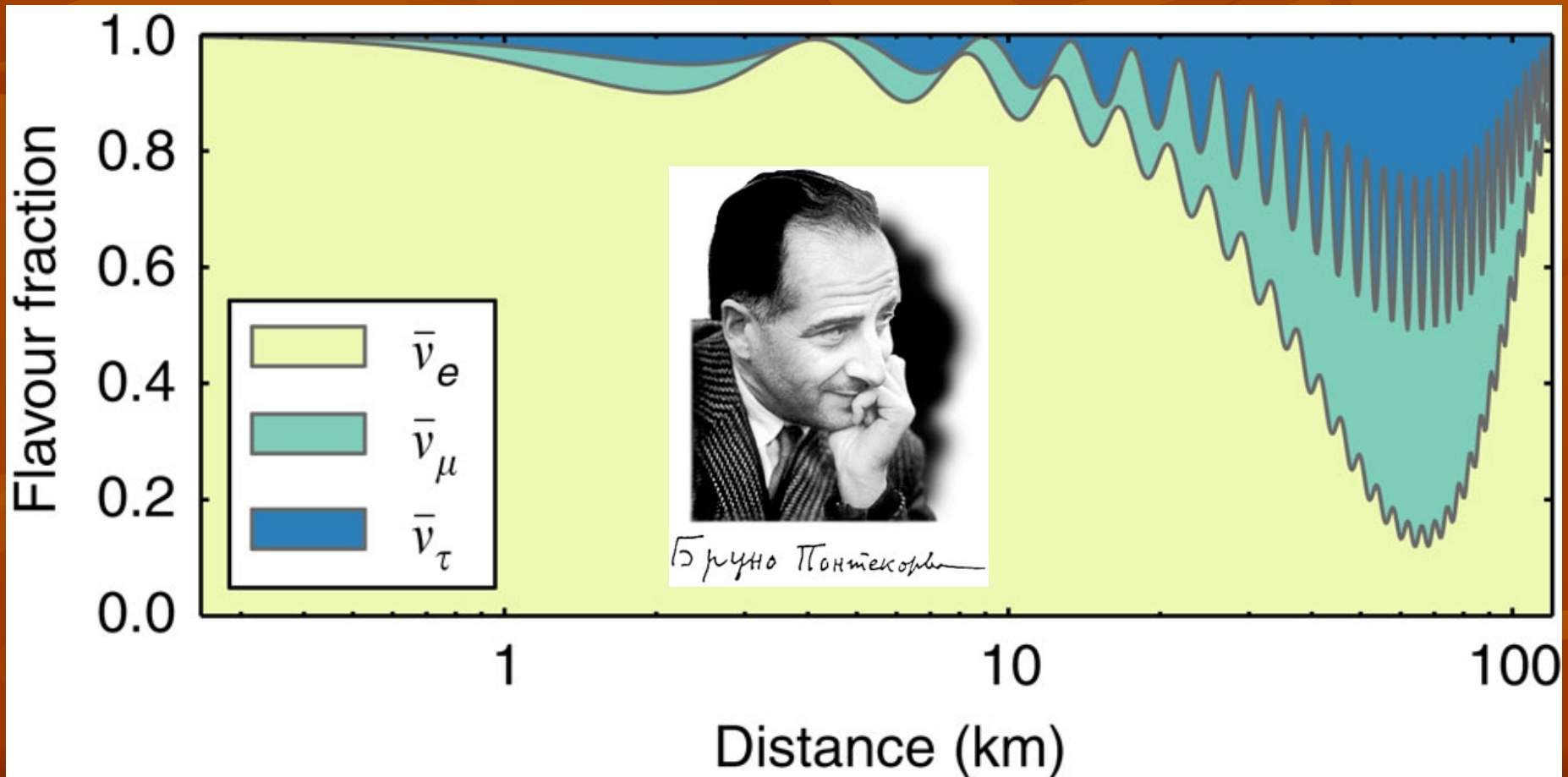
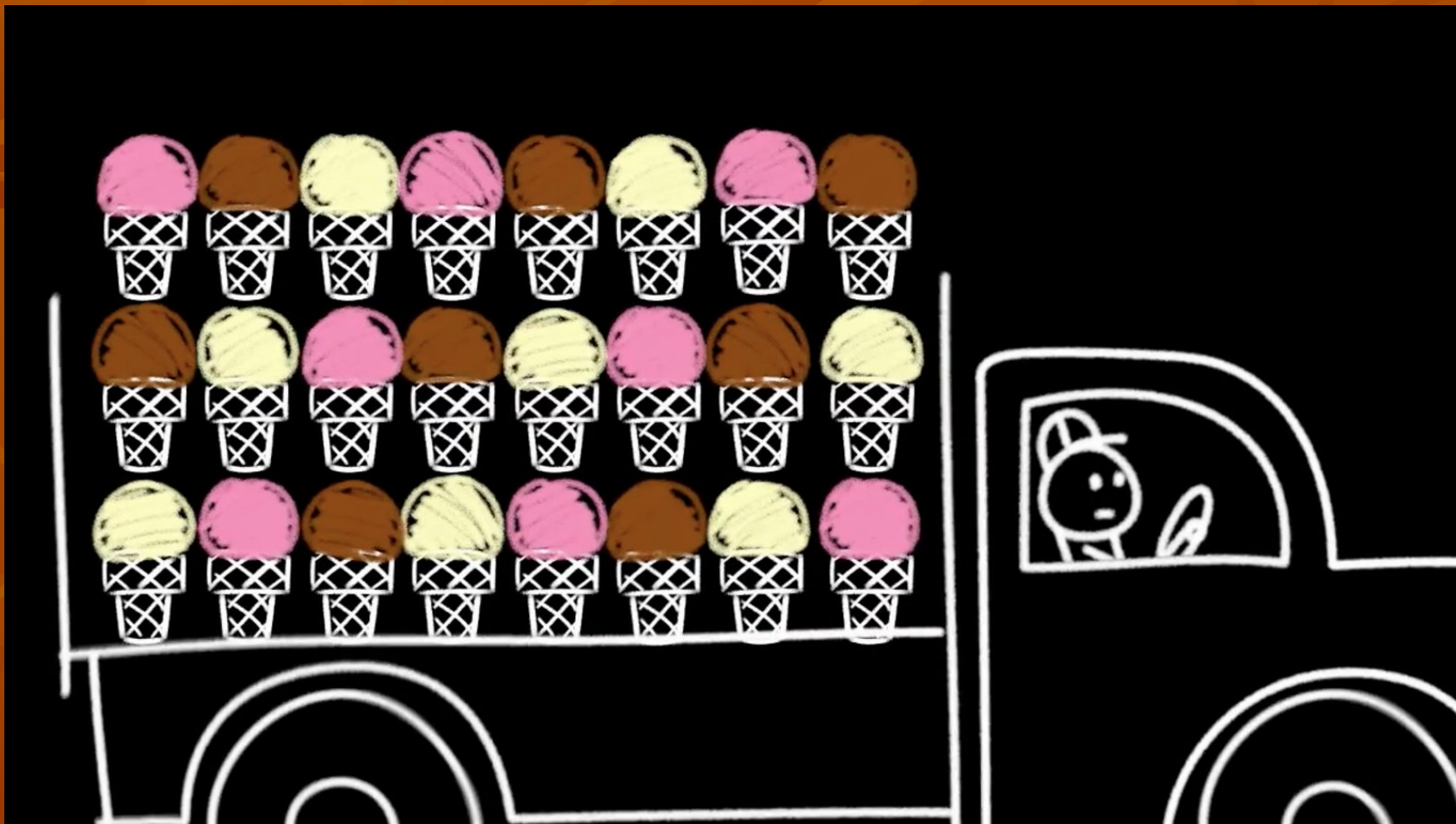


Illustration: © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

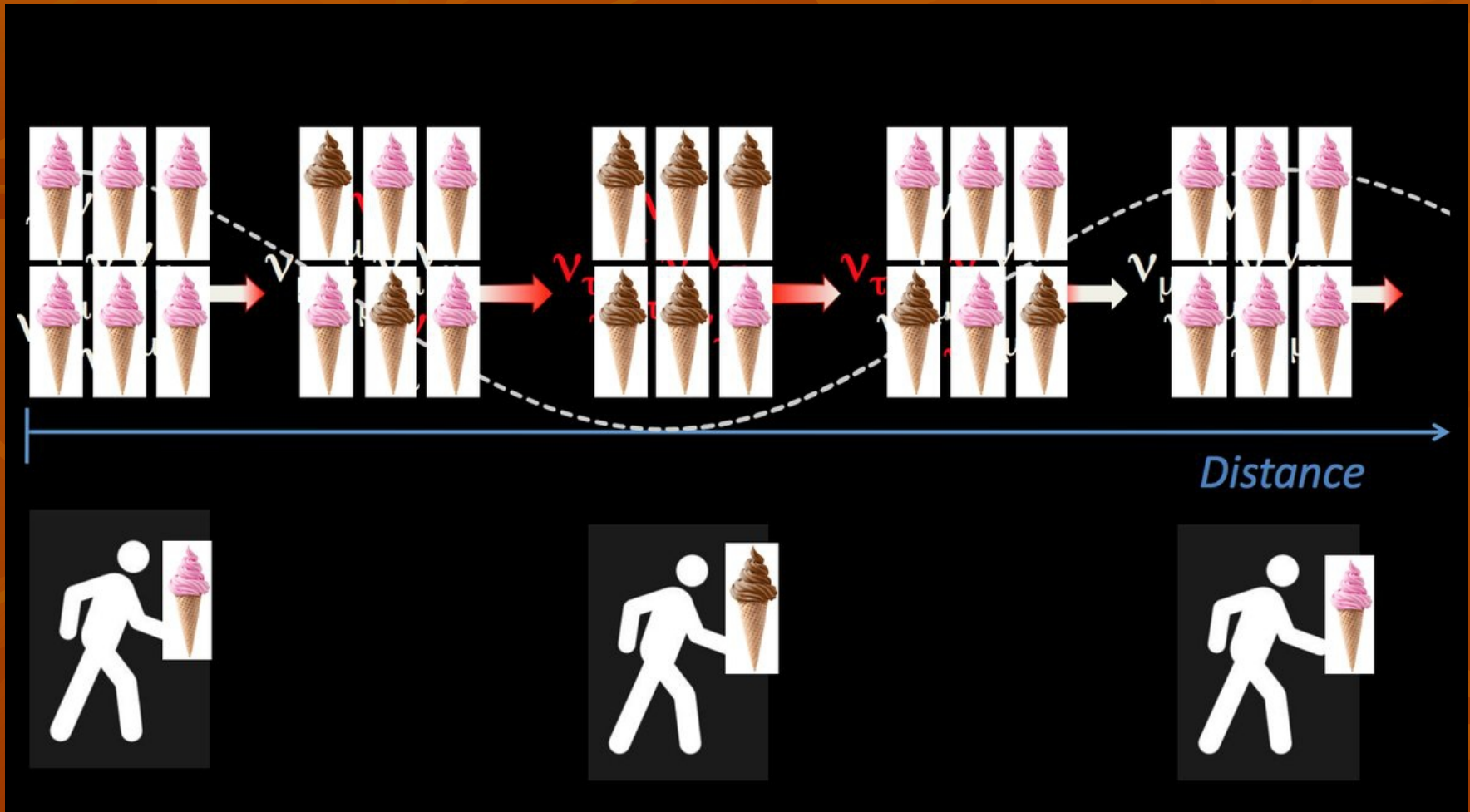
Нейтринные осцилляции



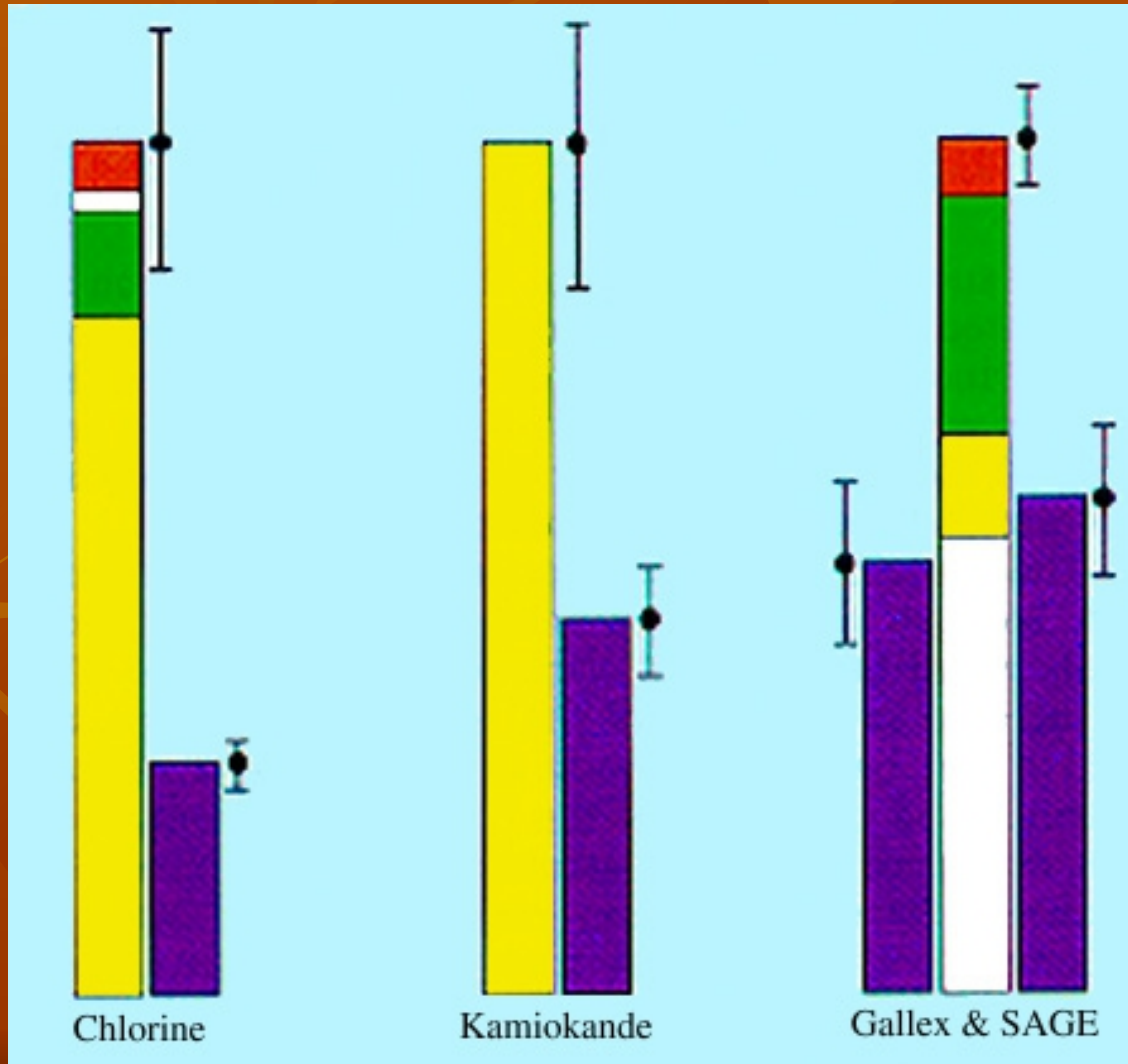
Осцилляции нейтрино



Осцилляции нейтрино



Дефицит солнечных нейтрино



Проверка осцилляторных моделей

BOREXINO and ν -Oscillations

- No oscillation hypothesis

$$75 \pm 4 \quad c/100t/d$$

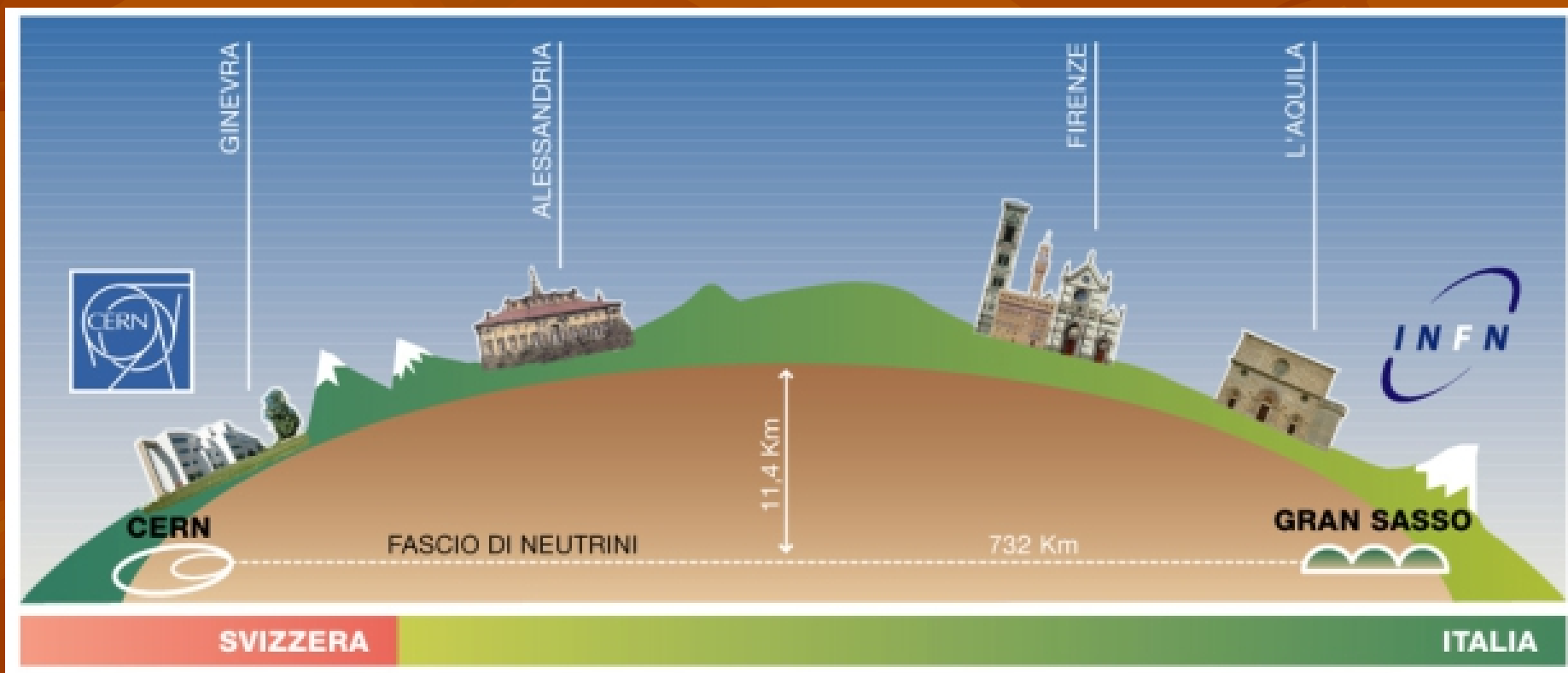
- Oscillation (so-called Large Mixing Solution)

$$49 \pm 4 \quad c/100t/d$$

- BOREXINO experimental result

$$47 \pm 7_{\text{stat}} \pm 12_{\text{sys}} \quad c/100t/d$$

Проект OPERA



Проект OPERA



Эксперимент NOvA (результаты 2014-15 гг.)

NOvA

A broad physics scope

Using $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$...

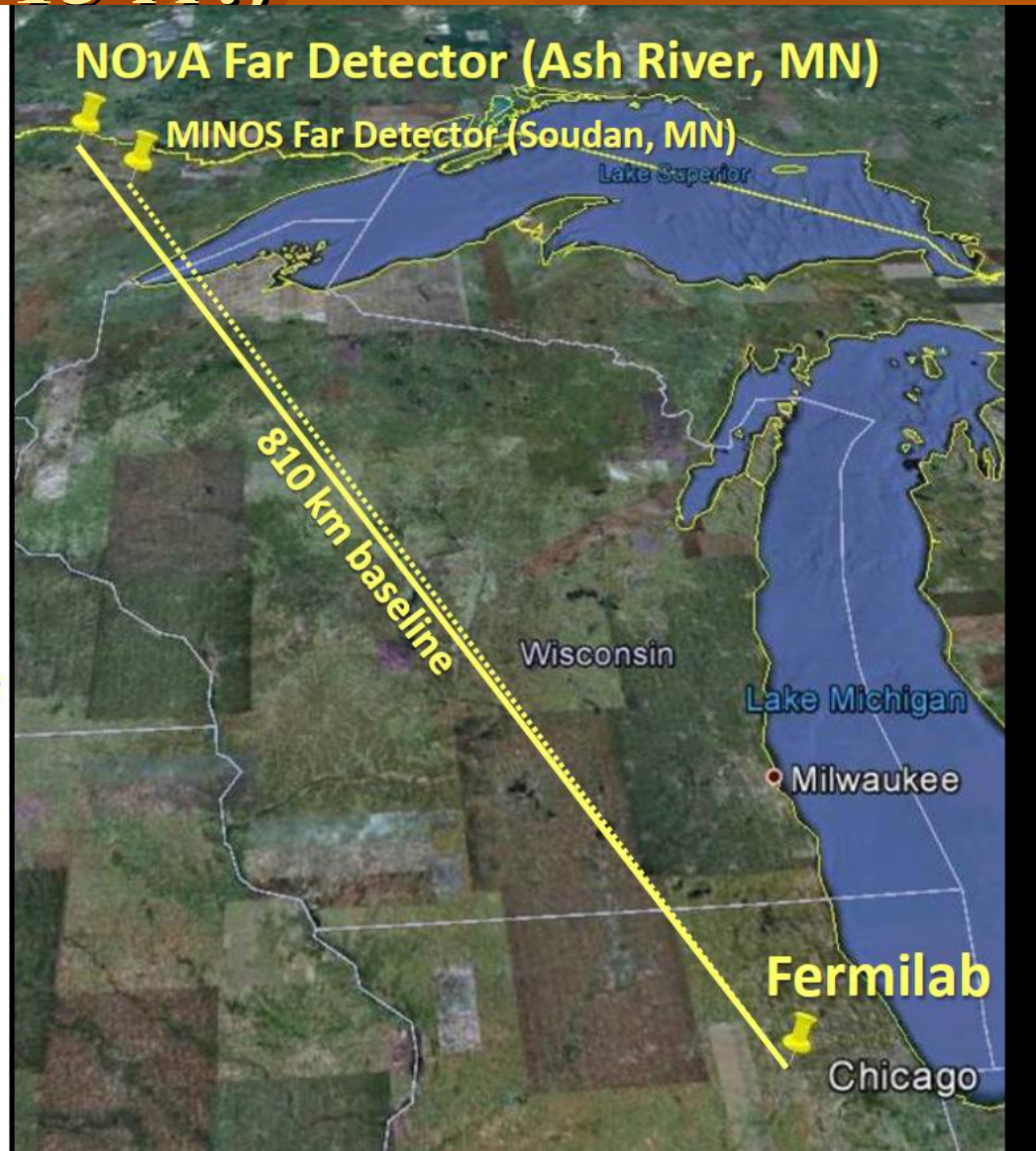
- Determine the ν mass hierarchy
- Determine the θ_{23} octant
- Constrain δ_{CP}

Using $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$, $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$...

- Precision measurements of $\sin^2 2\theta_{23}$ and Δm_{32}^2 .
(Exclude $\theta_{23} = \pi/4$?)
- **Over-constrain** the atmos. sector
(four oscillation channels)

Also ...

- Neutrino cross sections at the NOvA Near Detector
- Sterile neutrinos
- Supernova neutrinos
- Other exotica



Эксперимент NOvA (результаты 2014-15 гг.)

Far Detector selected events

LID: 6 ν_e candidates

3.3 σ significance for ν_e appearance

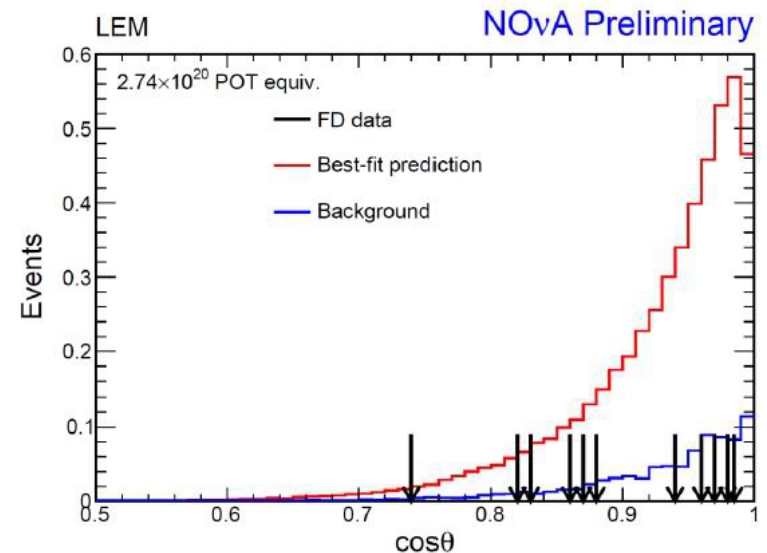
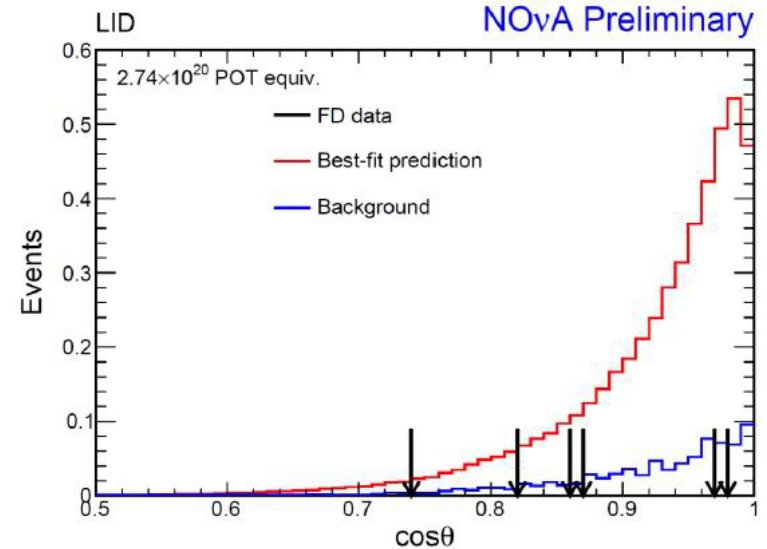
At right:

Reconstructed direction
of leading shower

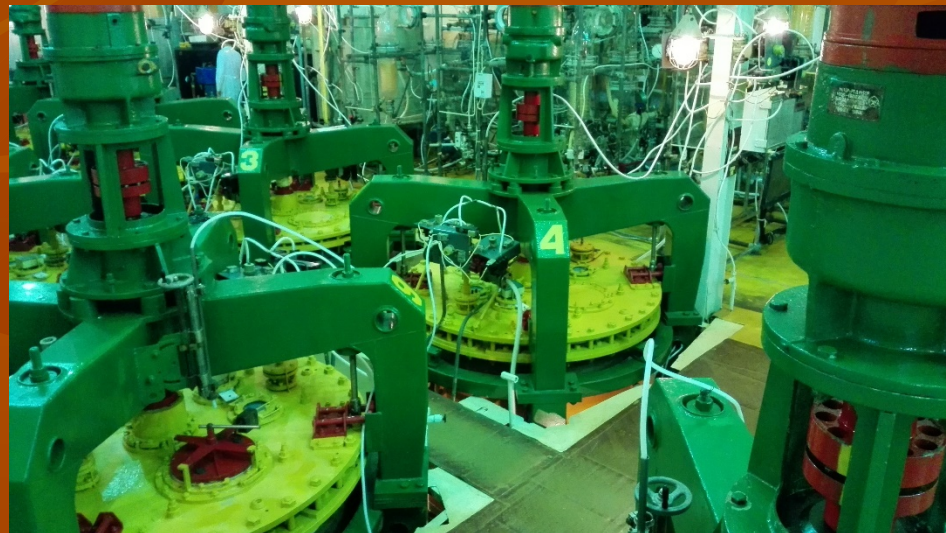
LEM: 11 ν_e candidates

5.5 σ significance for ν_e appearance

(All 6 LID events present in LEM set)

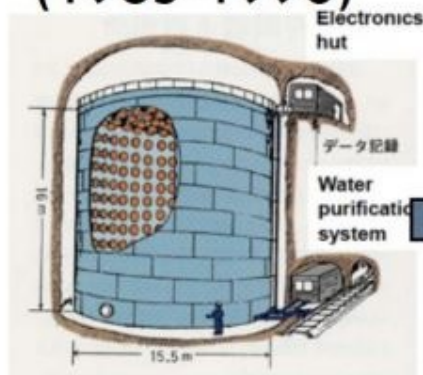


Исследование солнечных нейтрино



3 Generations of Kamioka Detector

Kamiokande
(1983-1996)



3kton

20% coverage
with 50cm PMT

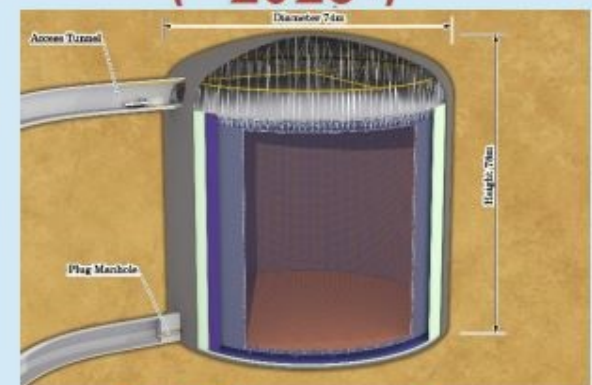
Super-Kamiokande
(1996-)



50kton

40% coverage
with 50cm PMT

Hyper-Kamiokande
(~2026-)



260kton×2

40% coverage
with high-QE 50cm PMT

x17

x10

Реакторные эксперименты

Experimental Setup...

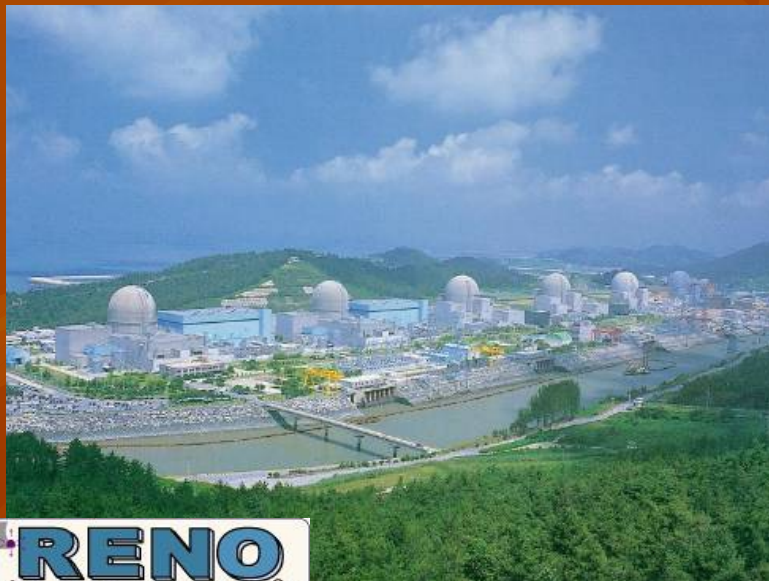
DOUBLE

Chooz Reactors
Power: 8.5GW_{th}

Near
<L> 400m
400v/day
120mwe
Target: 8.2t
Sept 2012

Far
<L> 1050m
50v/day
300mwe
Target: 8.2t
Dec. 2010

Exp't	Power (GW)	Distance N/F (m)	Target N/F (t)
Double Chooz	8.6	400/1050	8.2/8.2
RENO	17.3	290/1380	16/16
Daya Bay	11.6 (17.4)	360(500)/ 1990(1620)	2x40/80

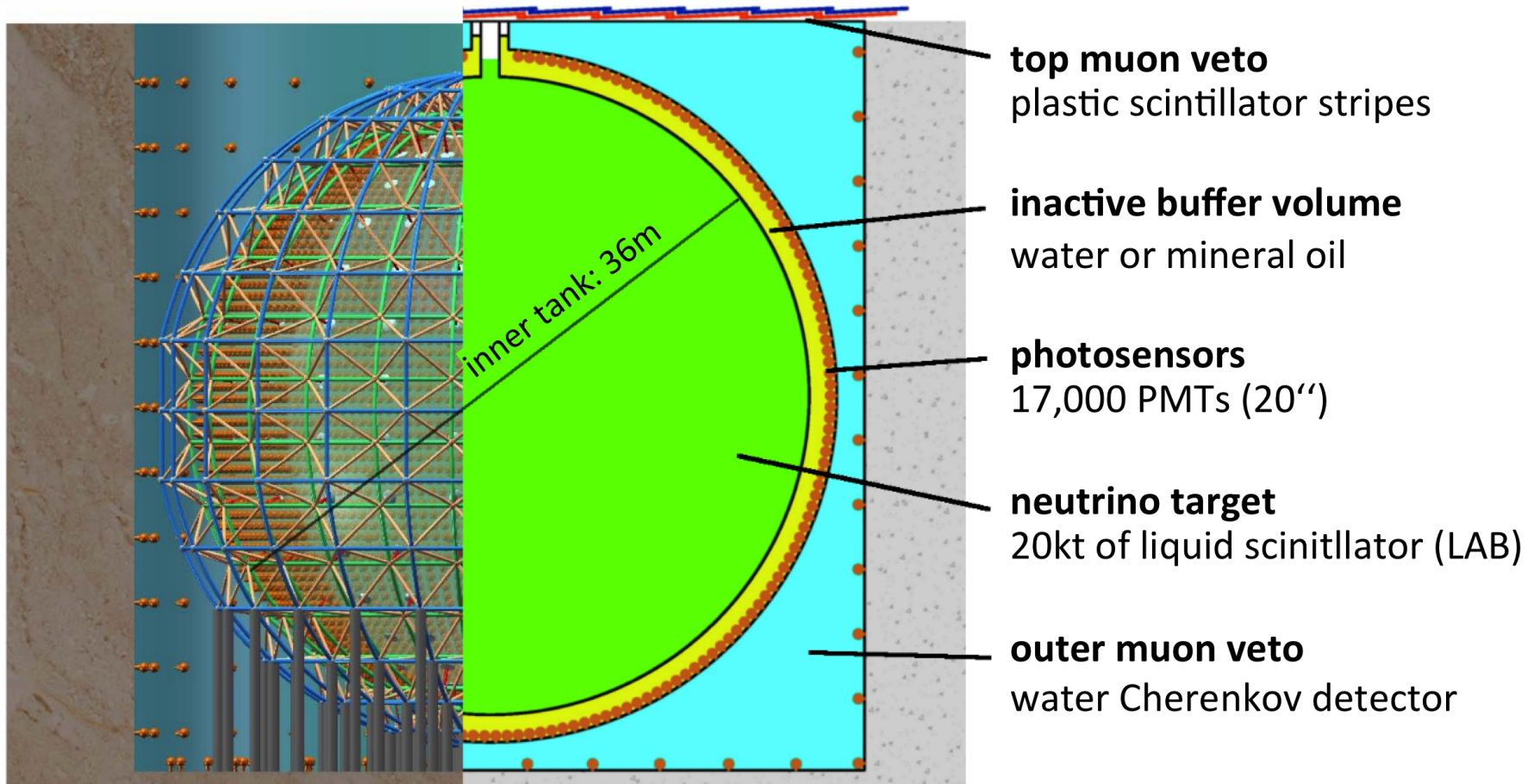


RENO
v θ_{13}



Daya Bay
13

Проект JUNO



Проект JUNO



Проект DUNE

Sanford Underground Research Facility, South Dakota

Fermi National Accelerator Laboratory, Illinois



Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE)

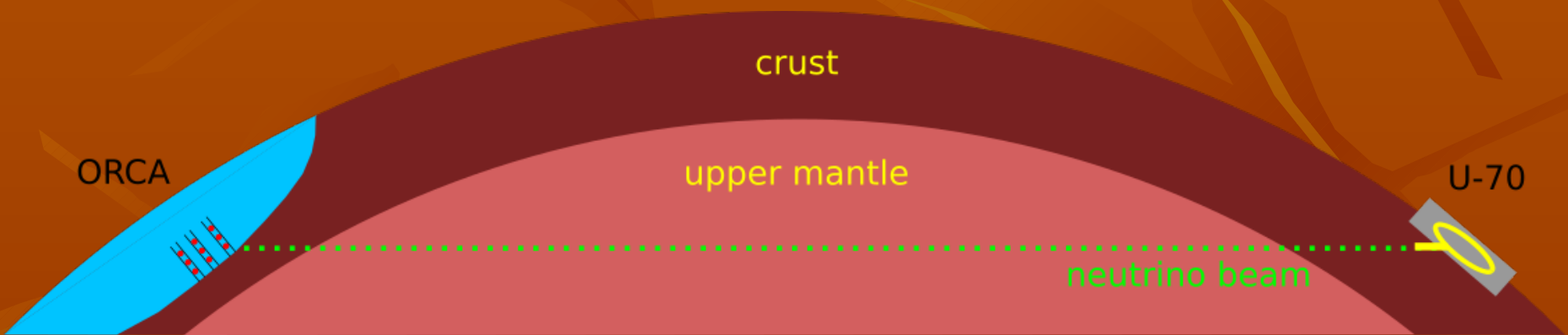


Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF)

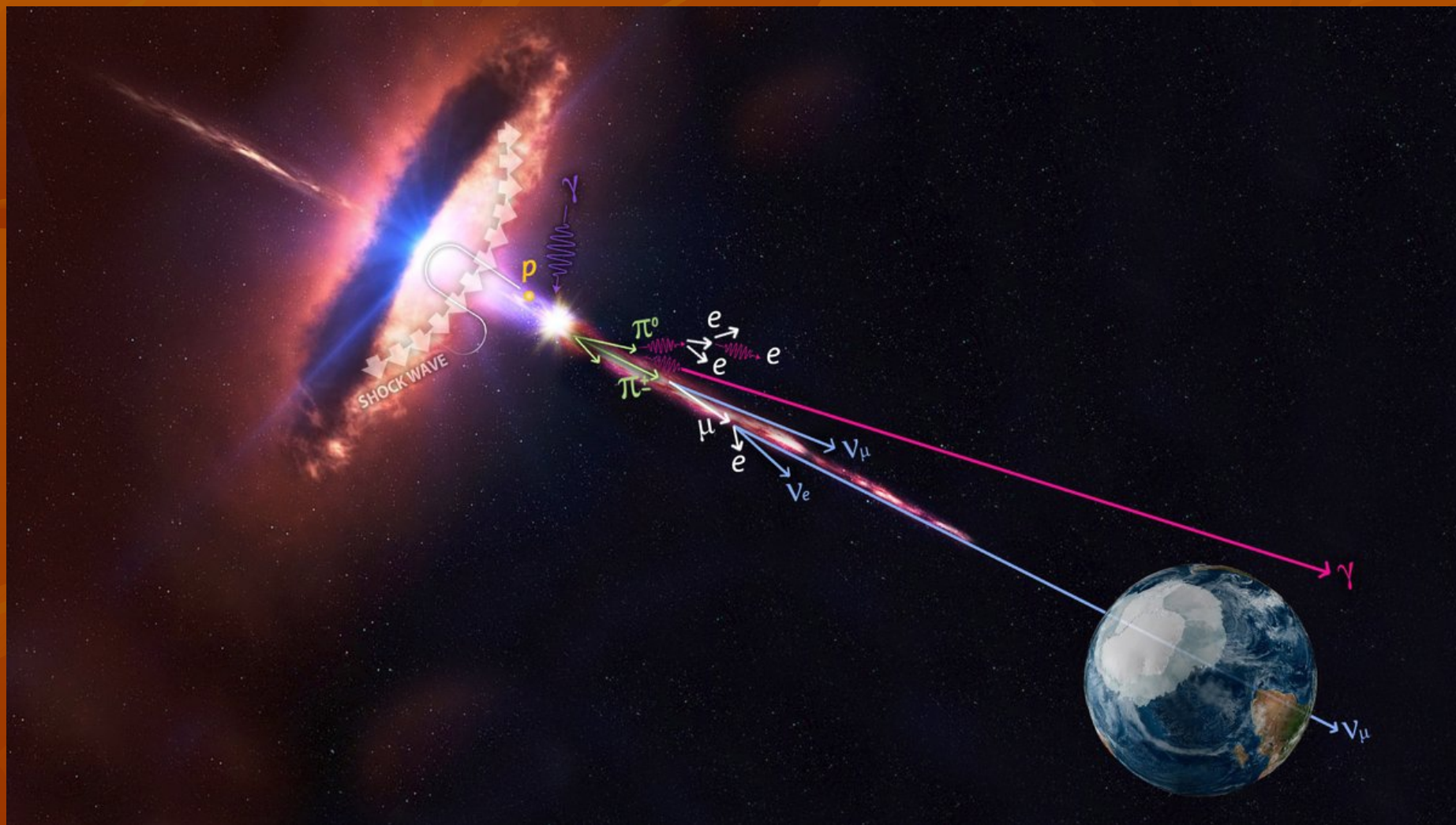


Proton Improvement Plan II (PIP-II)

Проект P2O (Protvino-to-ORCA)



Нейтринные телескопы



Астрофизические нейтрино как источник информации

I. Активные ядра галактик и гамма-всплески (GRB) – чрезвычайно мощные источники частиц и излучений во Вселенной

Источник частиц и излучений

Протоны высоких энергий

II. Протоны отклоняются мощными ЭМ полями галактик и взаимодействуют с источниками ЭМ излучений

нейтрино

IV. Только нейтрино могут проникать из самых удалённых частей Вселенной

Гамма-кванты высоких энергий

Отклонение низкоэнергичных протонов

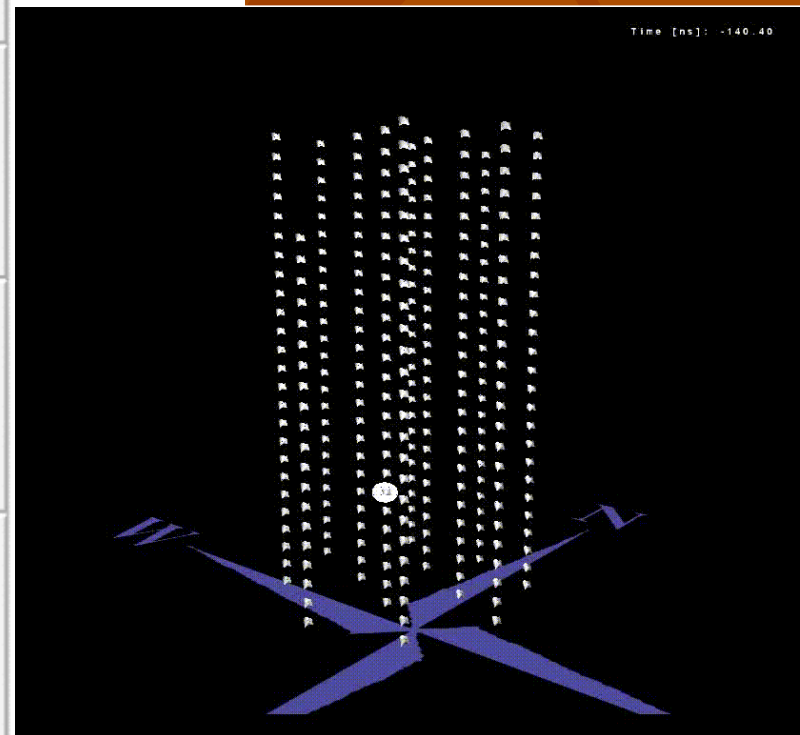
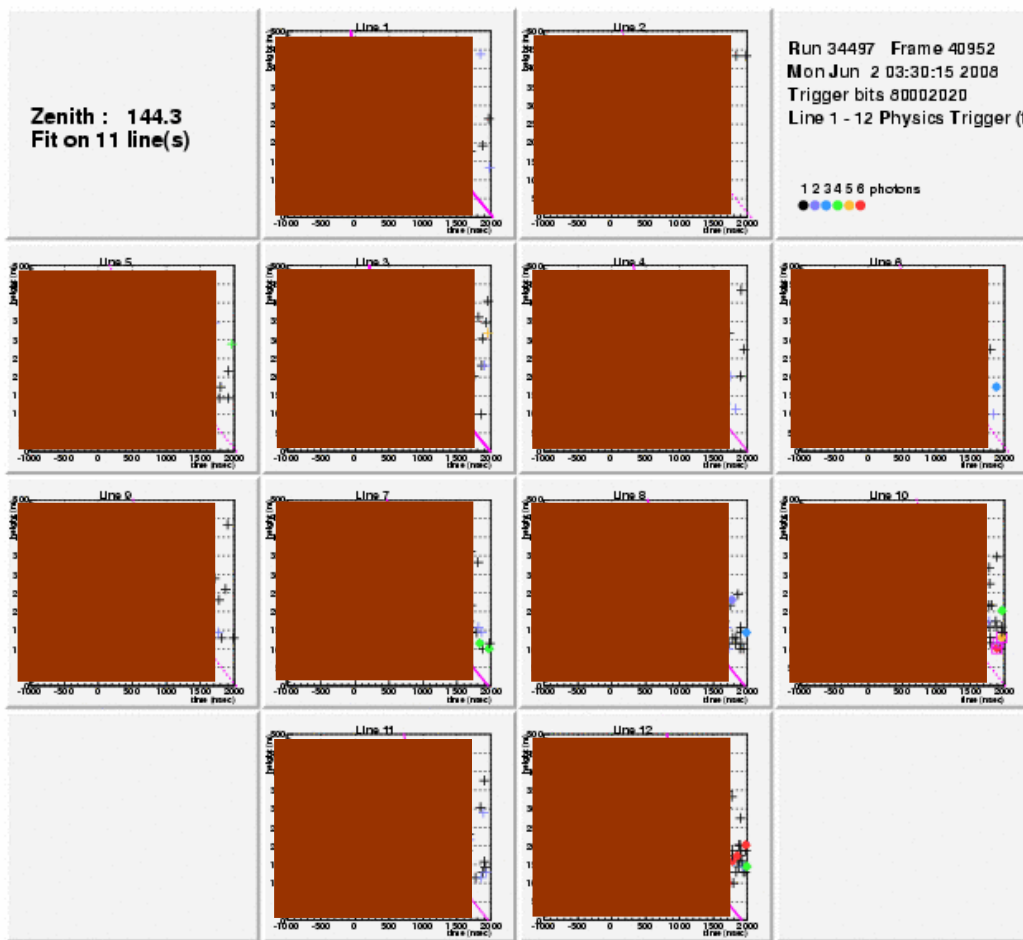
III. Гамма-кванты взаимодействуют с космическим фоном



Черенковский метод регистрации нейтрино



Мюон (12/12 линий)



Мультимессенджер

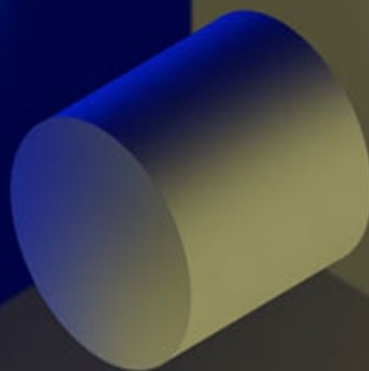
ПРАВДА



ПРАВДА



ИСТИНА



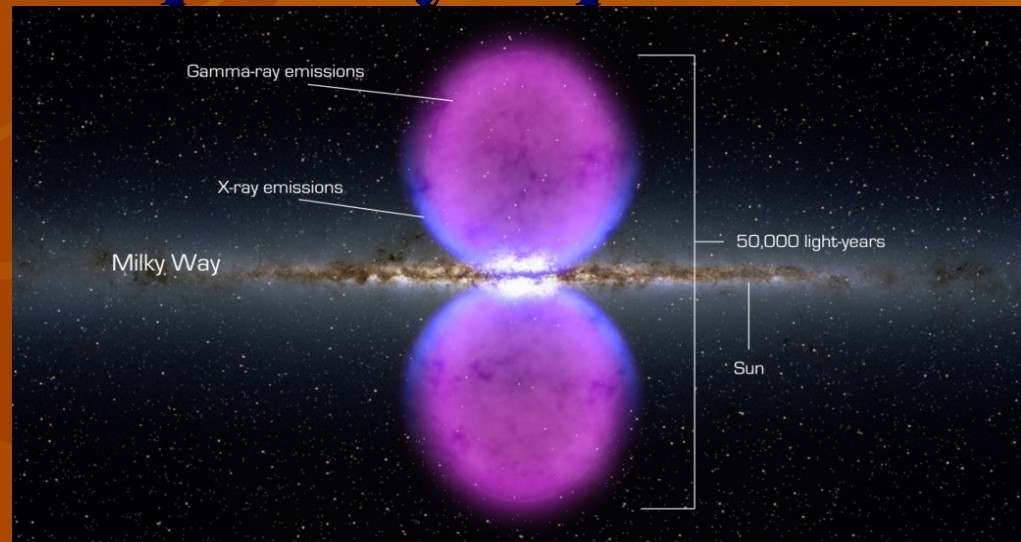
Мультимессенджер на примере события 17 августа 2017 г.



Нейтрино от Ферми пузырей

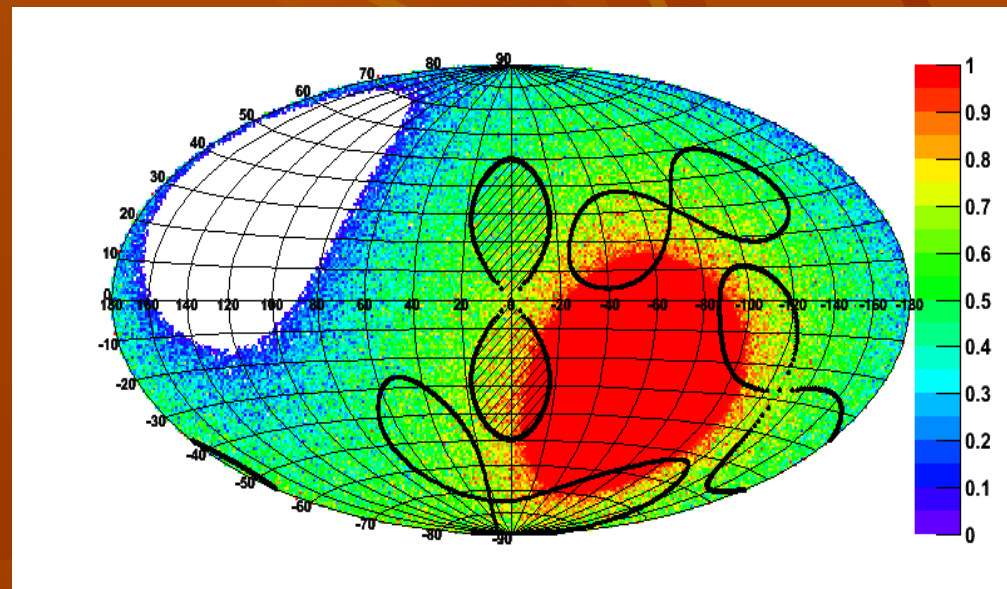
Ферми пузыри (Fermi bubbles):

- Поток гамма излучения
- Однородная интенсивность
- Резкие грани
- E^{-2} спектр (в районе 1 и 100 ГэВ)



Анализ:

- Сравнение с зонами вне предполагаемого источника
- Зоны одинакового размера с одинаковым ожидаемым фоном
- Оптимизация выбора событий по качеству восстановленного трека и энергии

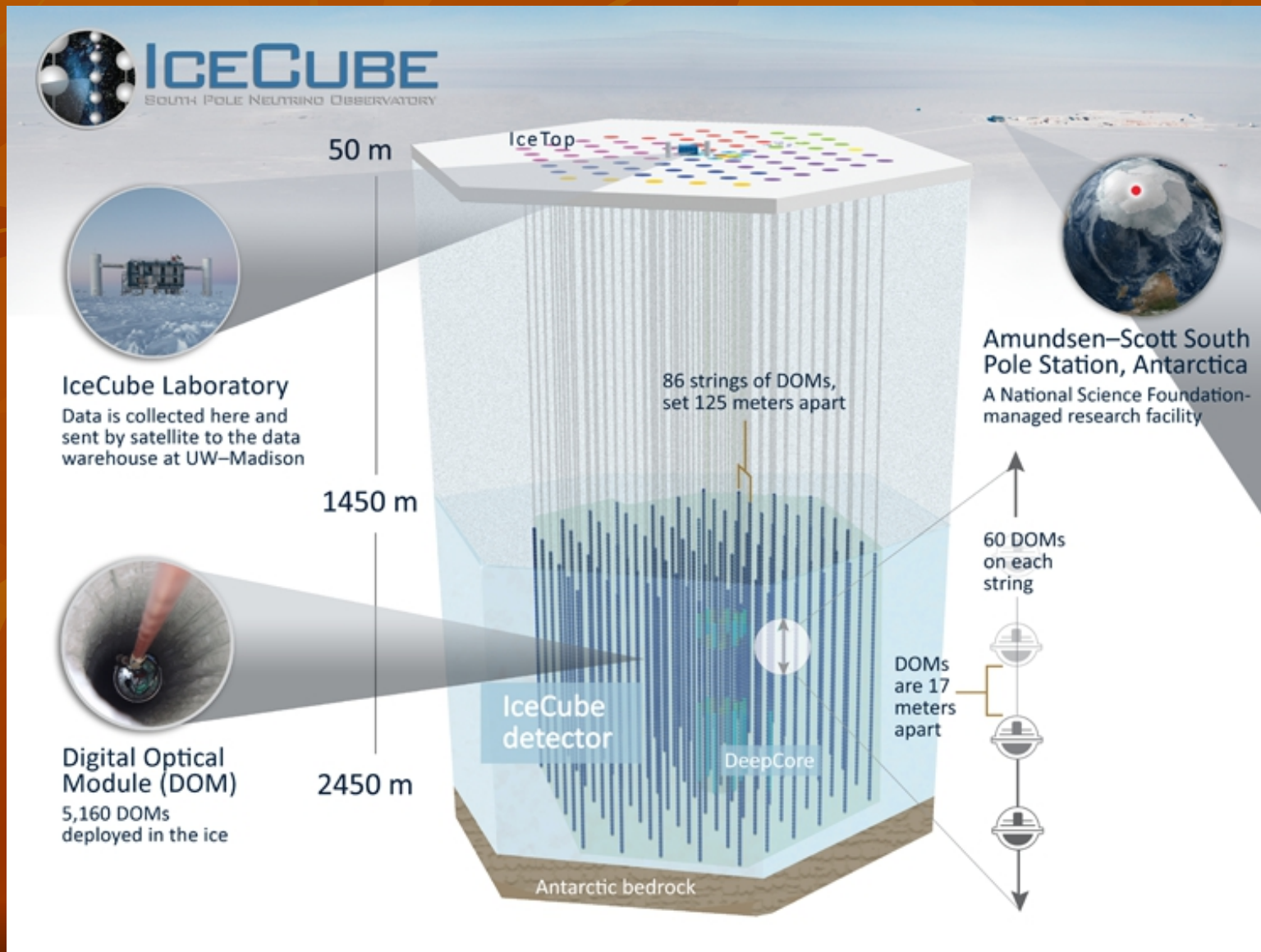


Галактические координаты

Текущая ситуация

- IceCube (1 куб.км), Южный полюс
- Байкальский телескоп (0.14 куб.км) Байкал, Россия
- ANTARES (0.09 куб.км) Тулон, Средиземное море
- KM3Net (1.2 куб.км) Capo Passero + ORCA

Детектор IceCube



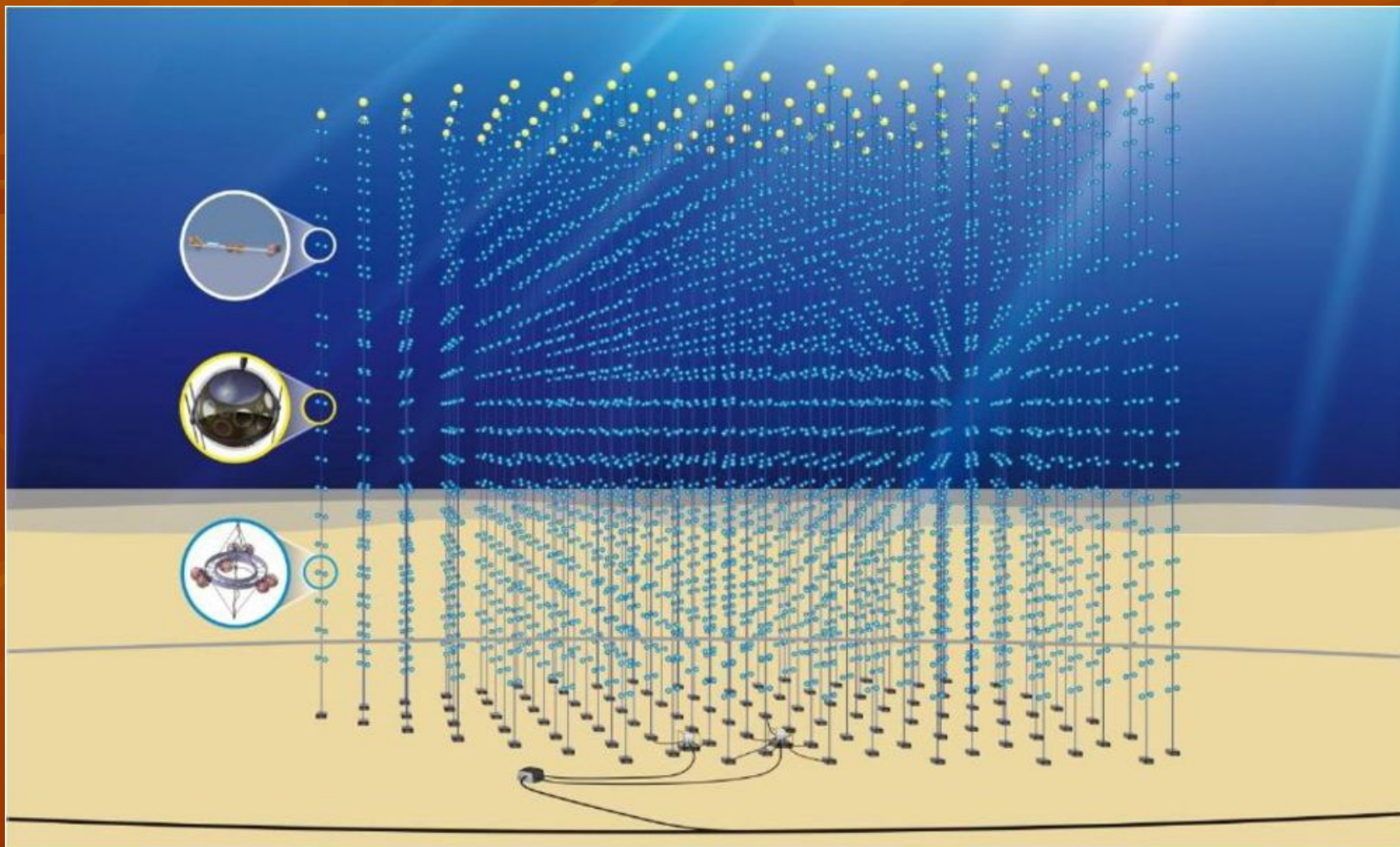
Блазар TXS 0506+56



Блазар TXS 0506+56



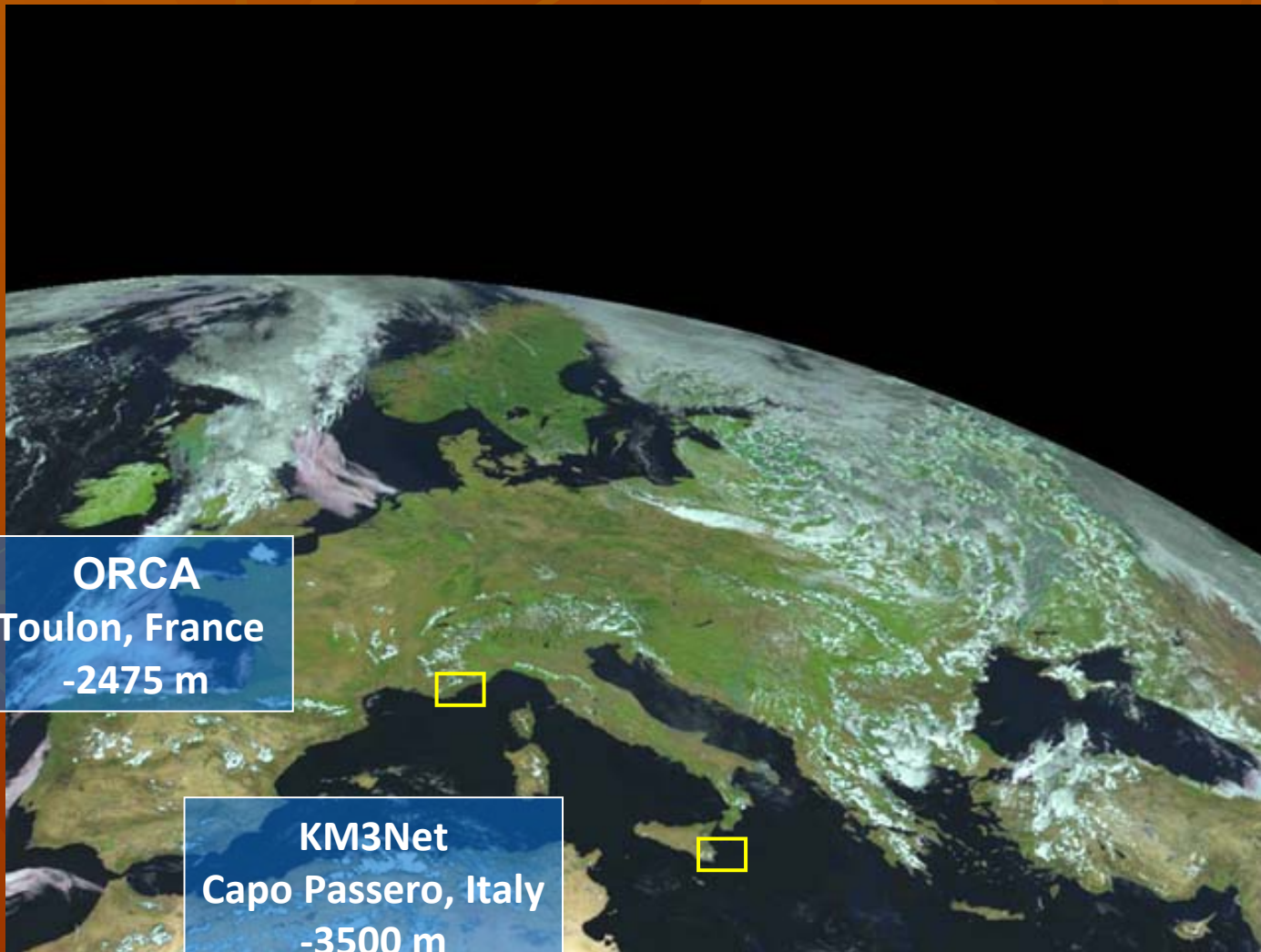
Проект KM3Net



Проект КМЗNet

- Предполагаемые сроки сооружения – 2014-21 гг.
- Предполагаемый объём – 1.2-1.4 куб.км
- Предполагаемая стоимость – 70-100 млн.€

Расположение



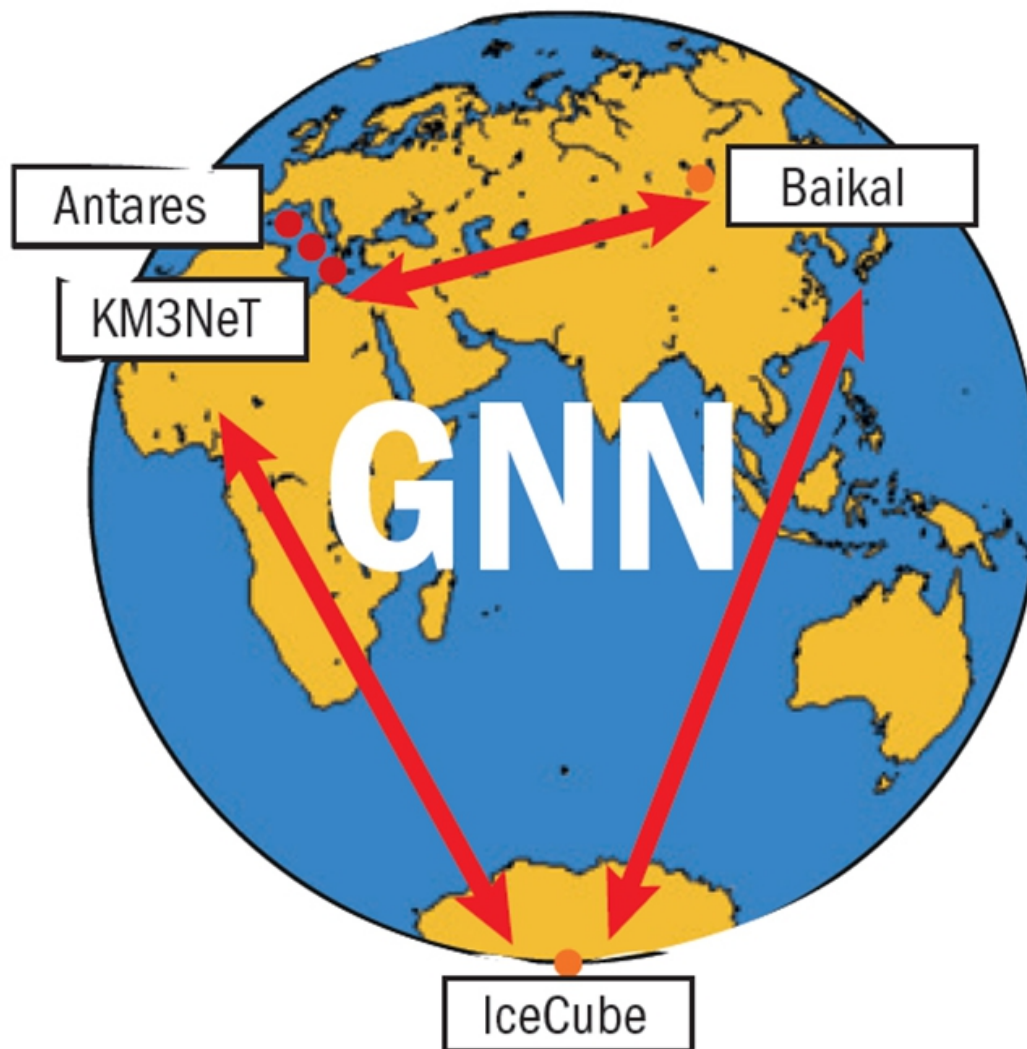
ORCA
Toulon, France
-2475 m

KM3Net
Capo Passero, Italy
-3500 m

Проект KM3Net



К 2022 году?





И ещё больше информации...

«Ядерная физика в интернете»:

<http://nuclphys.sinp.msu.ru/>

«От кварка до квазара» в соцсети ВКонтакте

https://vk.com/quark_quasar