

Поиски новой физики в нейтринных экспериментах

Сергей Троицкий
(отдел теоретической физики
Института ядерных исследований РАН)
st@ms2.inr.ac.ru

ИФВД РАН, 14 ноября 2011

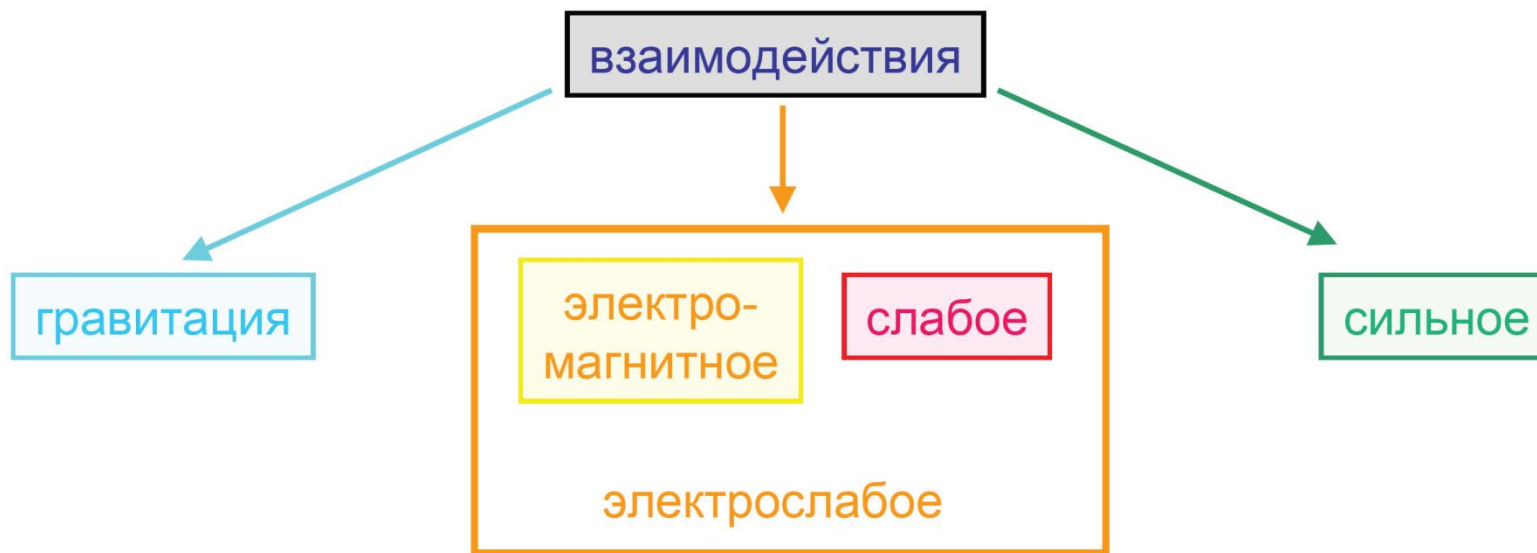
План:

1. Нейтрино в Стандартной модели элементарных частиц
2. Осцилляции нейтрино:
доказательство неполноты Стандартной модели
3. Нестандартные осцилляции:
новые типы нейтрино?
новые взаимодействия с веществом?
нарушение СРТ-инвариантности?
4. Измерение скорости нейтрино:
сверхсветовое движение?
5. Выводы

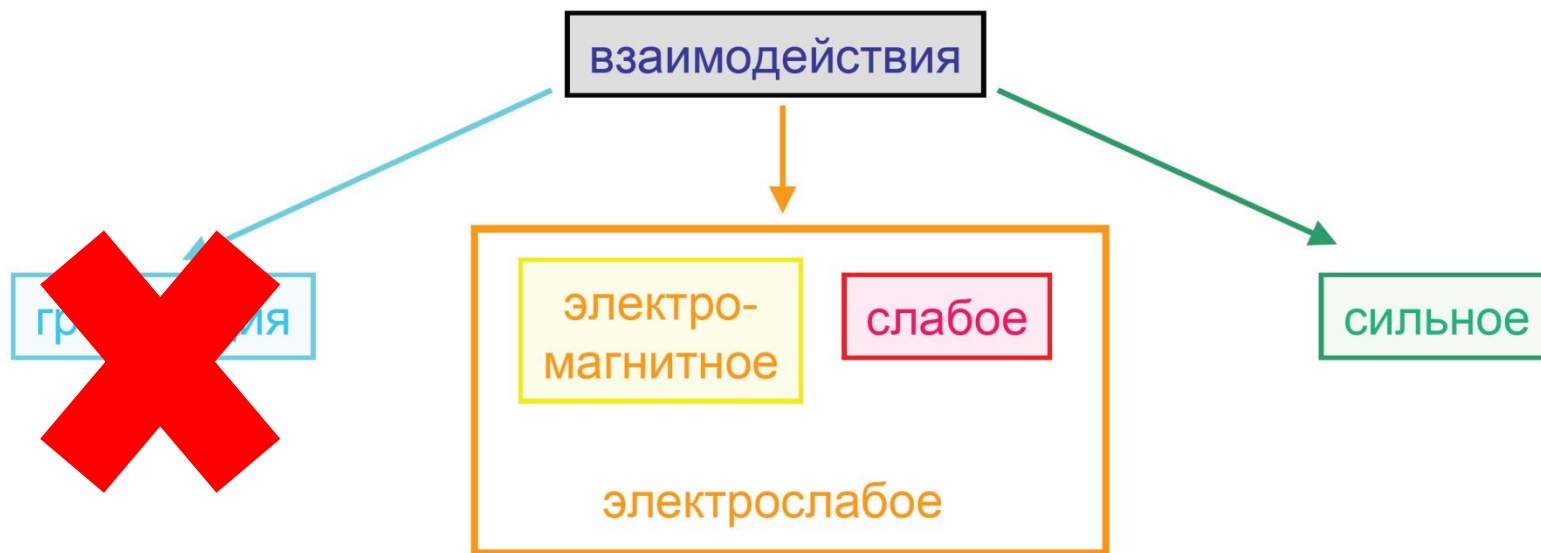
План:

1. Нейтрино в Стандартной модели элементарных частиц
2. Осцилляции нейтрино:
доказательство неполноты Стандартной модели
3. Нестандартные осцилляции:
новые типы нейтрино?
новые взаимодействия с веществом?
нарушение СРТ-инвариантности?
4. Измерение скорости нейтрино:
сверхсветовое движение?
5. Выводы

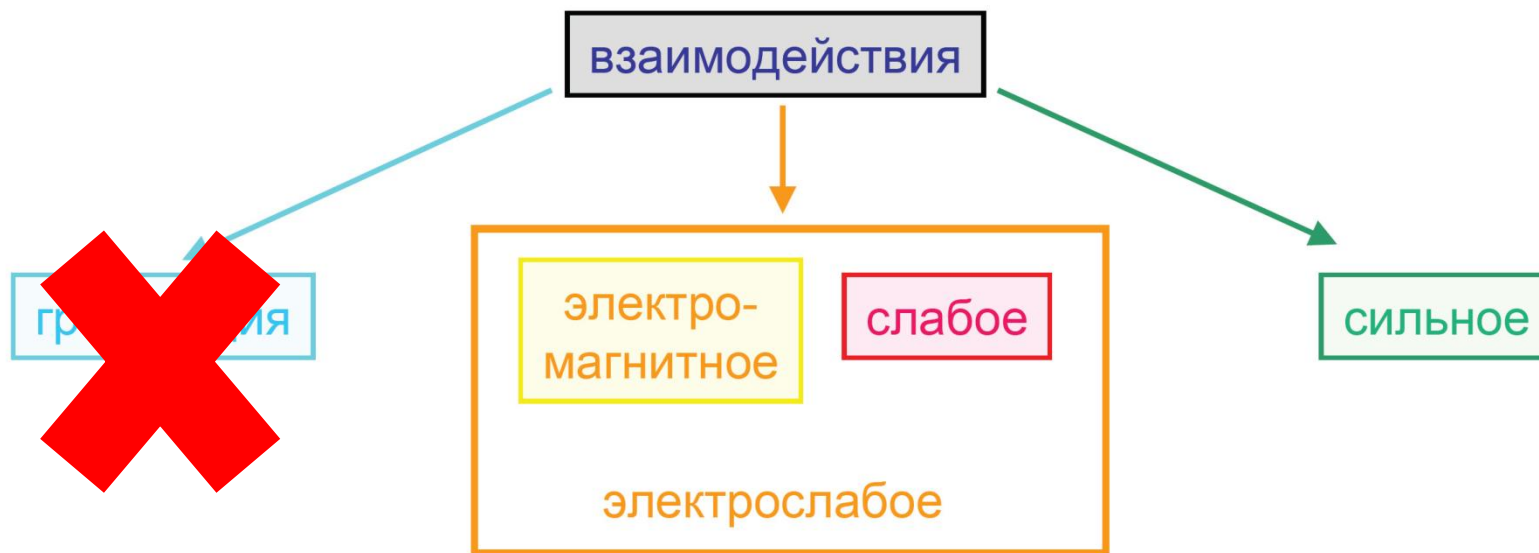
Стандартная модель элементарных частиц



Стандартная модель элементарных частиц



Стандартная модель элементарных частиц

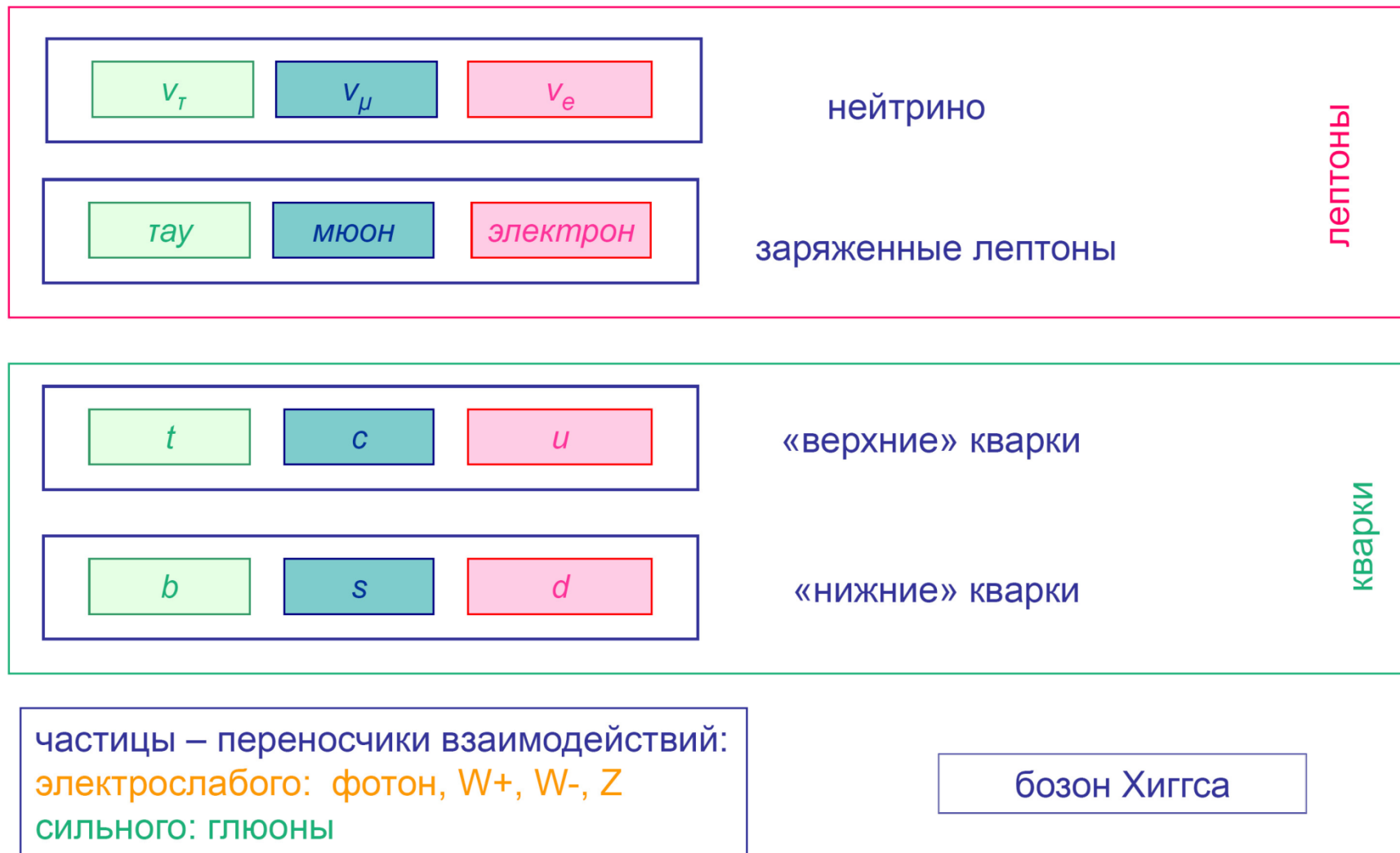


$$SU(3)_C \times SU(2)_W \times U(1)_Y$$

↓ Хиггс

$$SU(3)_C \times U(1)_{EM}$$

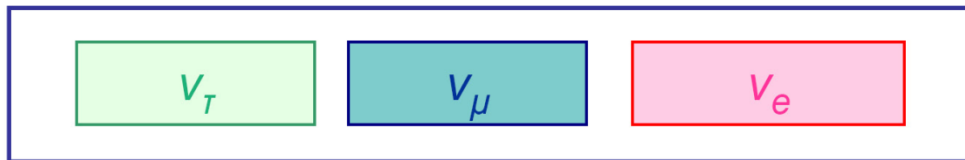
Стандартная модель элементарных частиц



Стандартная модель элементарных частиц

$$SU(3)_C \times SU(2)_W \times U(1)_Y$$

**массы нейтрино запрещены
симметриями Стандартной модели**



нейтрино

**тип нейтрино сохраняется
при нулевой массе**

План:

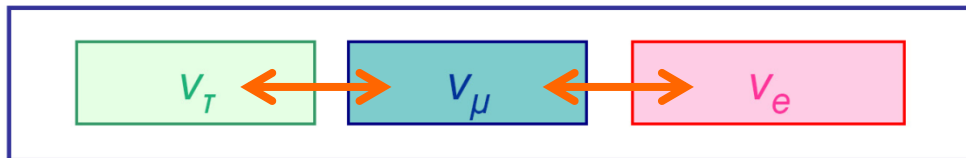
1. Нейтрино в Стандартной модели элементарных частиц
2. Осцилляции нейтрино:
доказательство неполноты Стандартной модели
3. Нестандартные осцилляции:
новые типы нейтрино?
новые взаимодействия с веществом?
нарушение СРТ-инвариантности?
4. Измерение скорости нейтрино:
сверхсветовое движение?
5. Выводы

Осцилляции нейтрино

**массы нейтрино запрещены
симметриями Стандартной модели**

**тип нейтрино сохраняется
при нулевой массе**

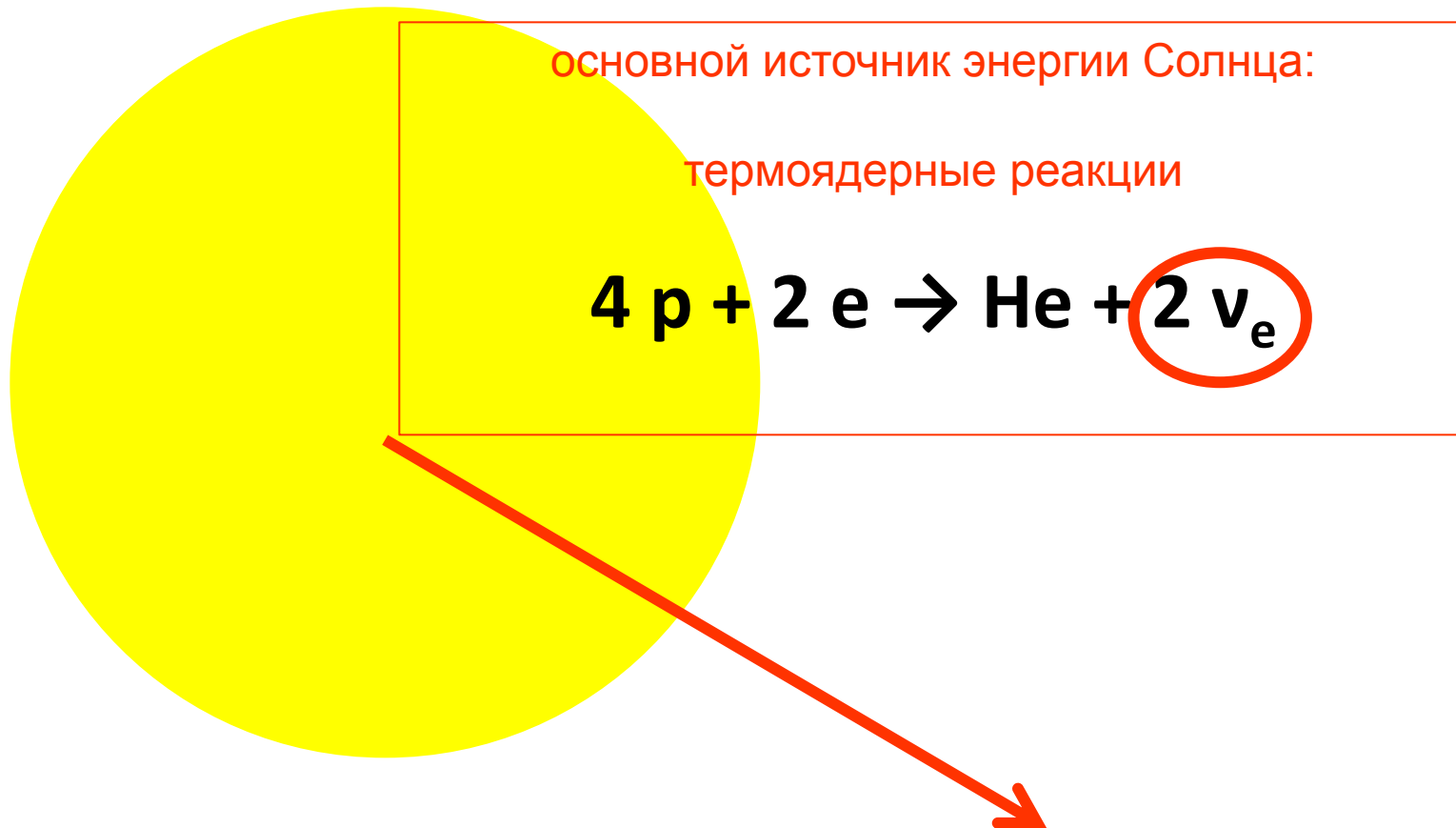
**изменения типа нейтрино
достоверно
зарегистрированы экспериментально**



нейтрино

Осцилляции нейтрино: **солнечные нейтрино**

астрономия ➡ модель Солнца ➡ предсказания потока нейтрино



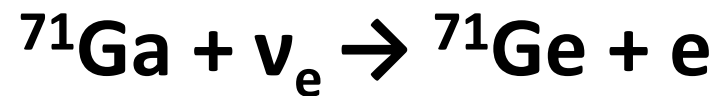
Осцилляции нейтрино: **солнечные нейтрино**

измерение потока нейтрино



Пример: галлий-германиевый детектор
(чувствителен к нейтрино основного pp-канала)

*Баксанская нейтринная обсерватория
ИЯИ РАН, Приэльбрусье*



60 тонн

Осцилляции нейтрино: **солнечные нейтрино**

измерение потока нейтрино



Пример: галлий-германиевый детектор
(чувствителен к нейтрино основного pp-канала)

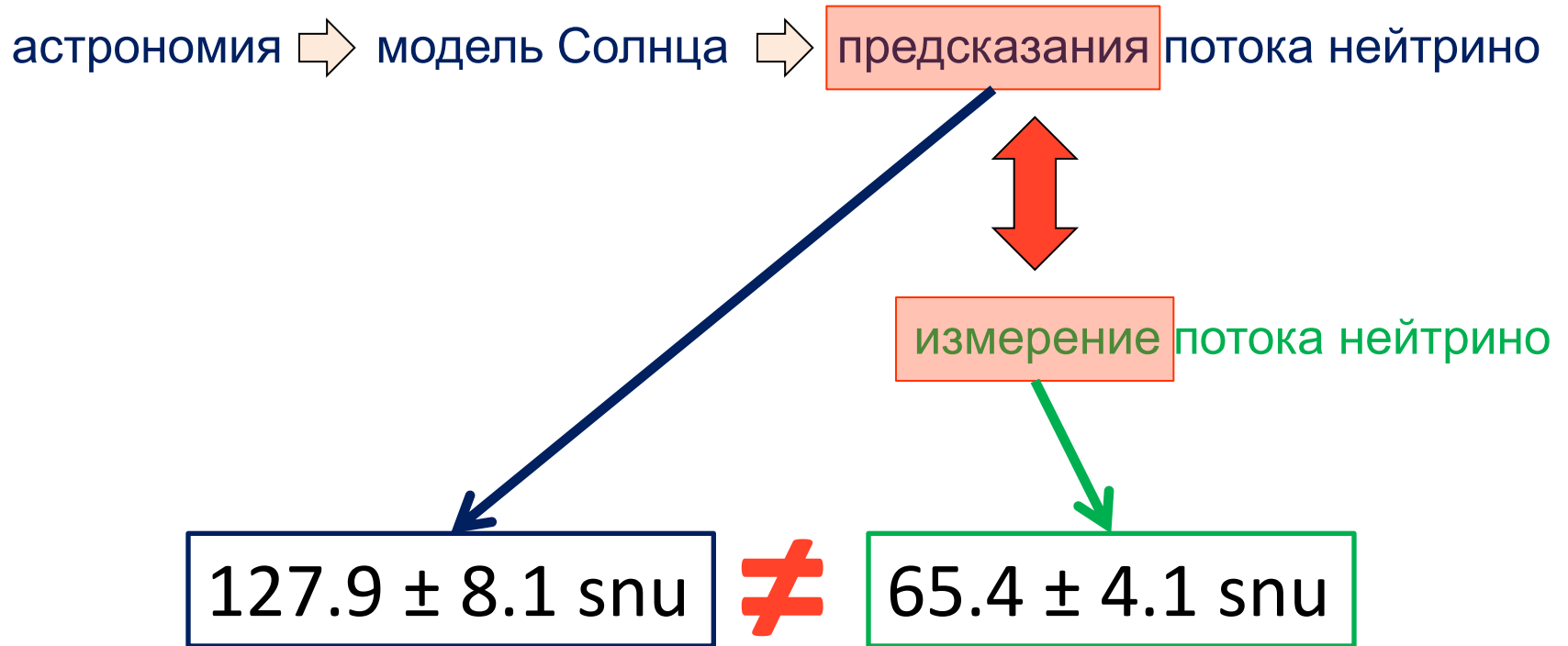
*Баксанская нейтринная обсерватория
ИЯИ РАН, Приэльбрусье*



60 тонн

15 атомов

Осцилляции нейтрино: **солнечные нейтрино**



[для галлий-германиего эксперимента]

Осцилляции нейтрино: **солнечные нейтрино**

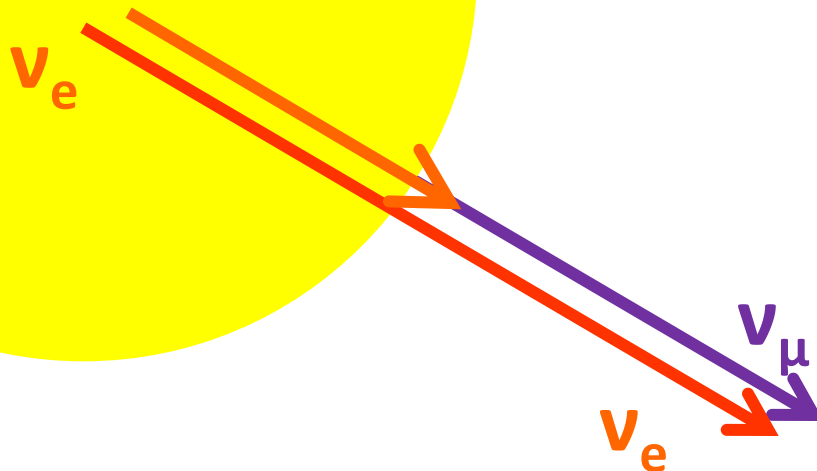
осцилляции нейтрино!!!

единственное
экспериментальное
подтверждение
неполноты
Стандартной модели
элементарных частиц

независимое измерение

потока ν_e

и полного потока ν всех типов

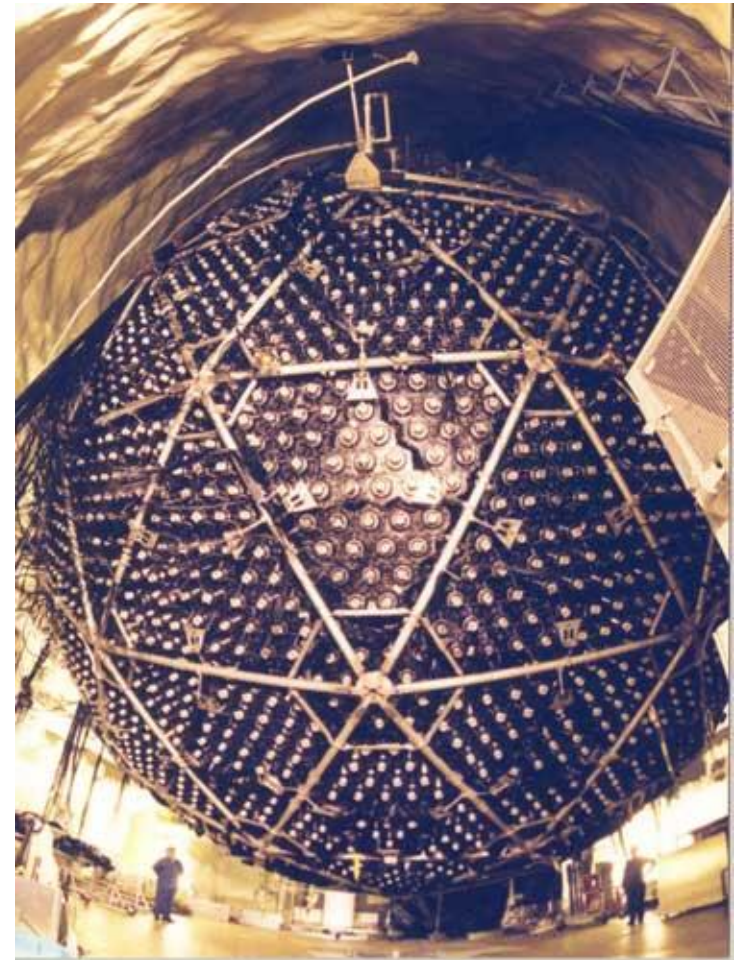
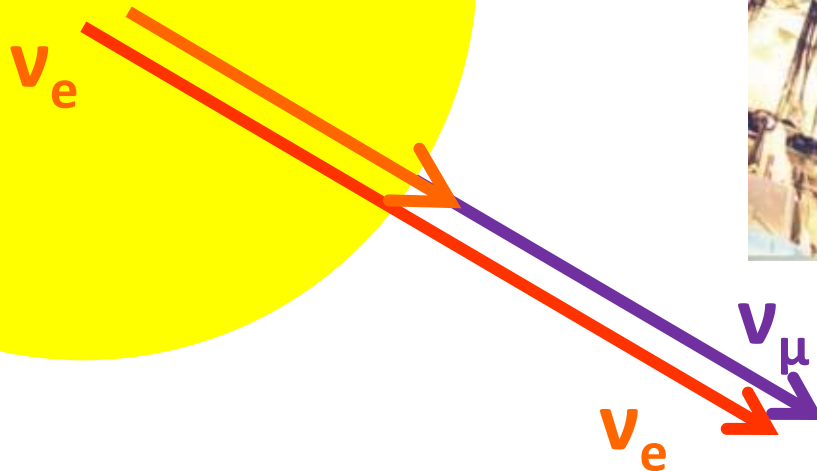


*SNO
Sudbury, Canada*

Осцилляции нейтрино: **солнечные нейтрино**

осцилляции нейтрино!!!

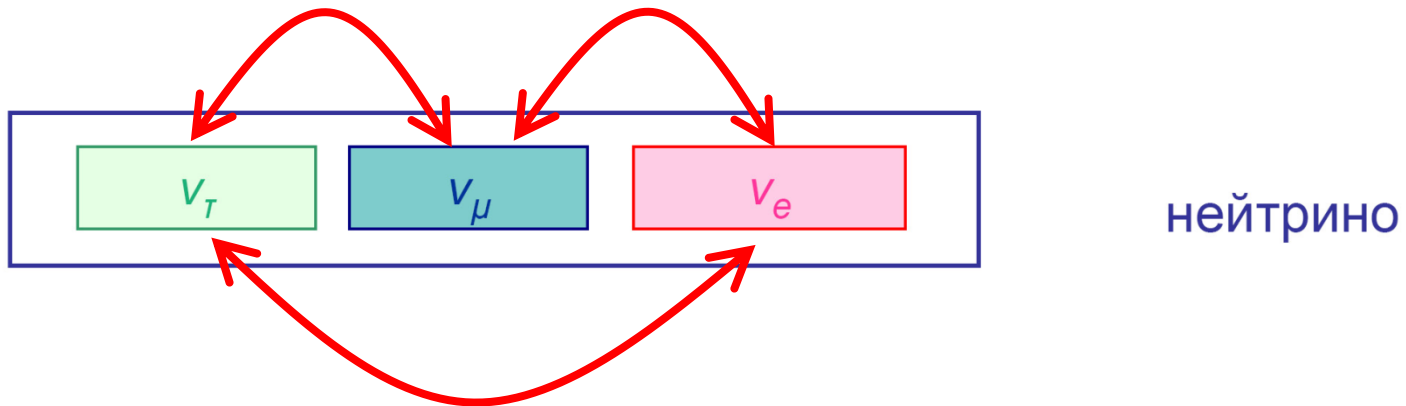
единственное
экспериментальное
подтверждение
неполноты
Стандартной модели
элементарных частиц



*SNO
Sudbury, Canada*

Осцилляции нейтрино:

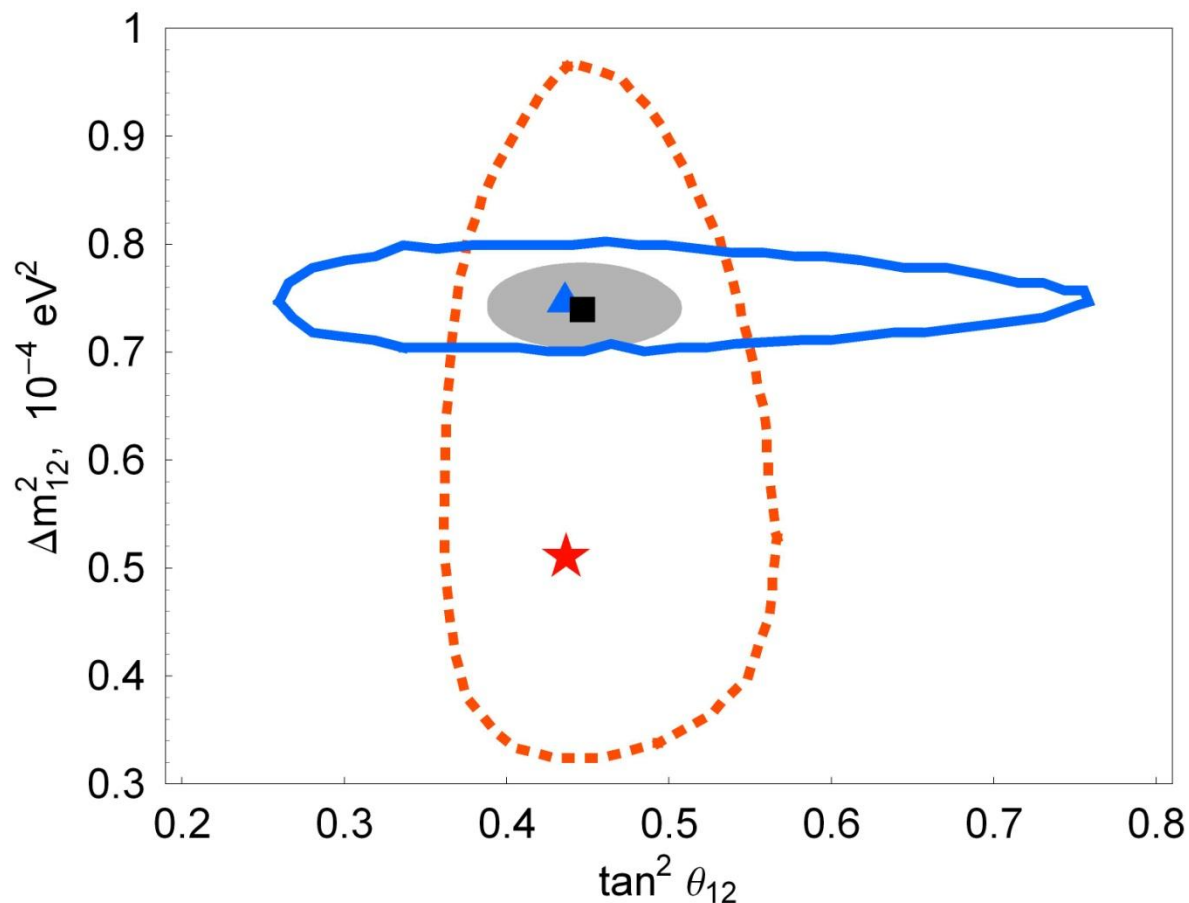
- **солнечные нейтрино**
- **атмосферные нейтрино**
- **реакторные нейтрино**
- **ускорительные нейтрино**



**«стандартная» картина осцилляций 3-х типов нейтрино
(расширение Стандартной модели физики частиц!)**

Осцилляции нейтрино: параметры Δm^2_{ij} , θ_{ij}

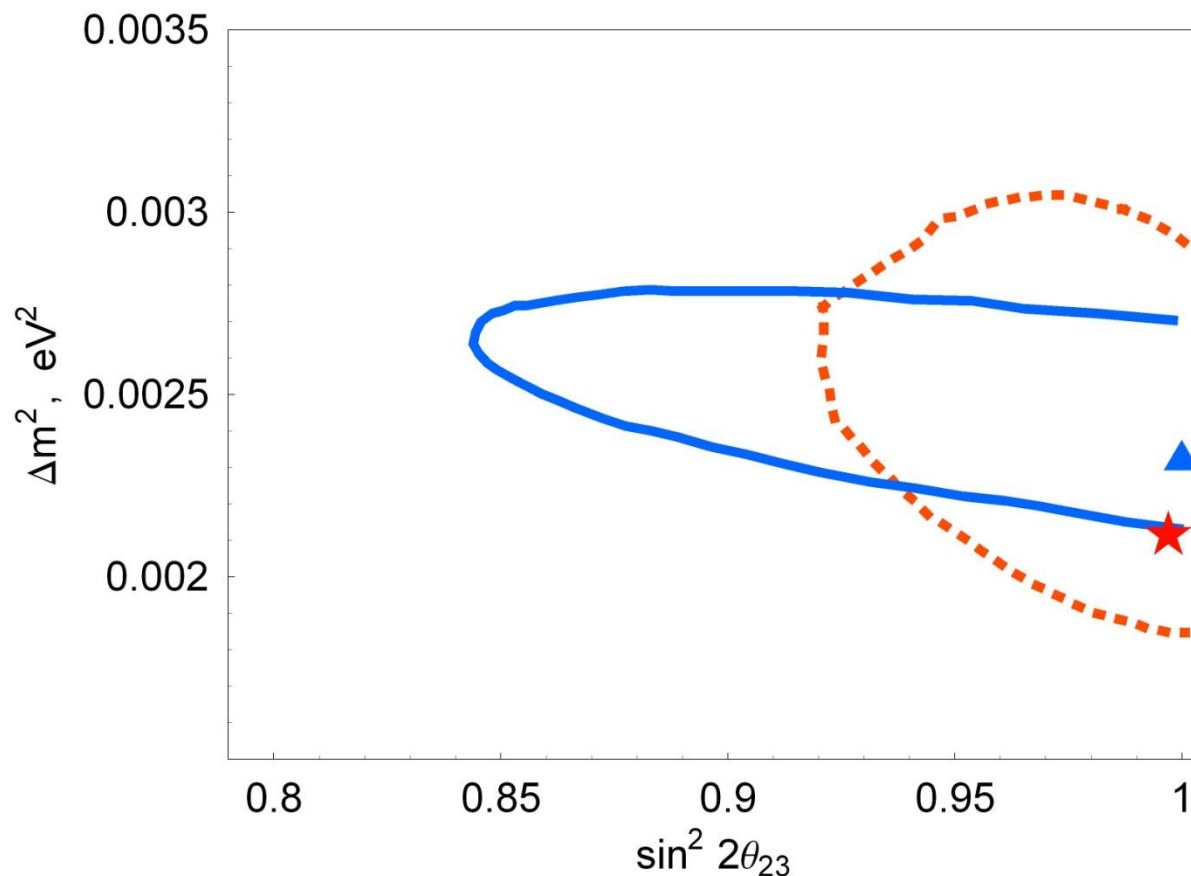
$\nu_e \longleftrightarrow \nu_\mu$



**«стандартная» картина осцилляций 3-х типов нейтрино
(расширение Стандартной модели физики частиц!)**

Осцилляции нейтрино: параметры Δm^2_{ij} , θ_{ij}

$$\nu_\tau \longleftrightarrow \nu_\mu$$



**«стандартная» картина осцилляций 3-х типов нейтрино
(расширение Стандартной модели физики частиц!)**

Осцилляции нейтрино: параметры Δm^2_{ij} , θ_{ij}

Δm^2_{12}	$=$	$(7.58^{+0.22}_{-0.26}) \times 10^{-5} \text{ эВ}^2$
Δm^2_{23}	$=$	$(2.31^{+0.12}_{-0.09}) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$
$\sin^2 \theta_{12}$	$=$	$0.312^{+0.017}_{-0.016}$
$\sin^2 \theta_{13}$	$=$	0.025 ± 0.007
$\sin^2 \theta_{23}$	$=$	$0.42^{+0.08}_{-0.03}$

**«стандартная» картина осцилляций 3-х типов нейтрино
(расширение Стандартной модели физики частиц!)**

План:

1. Нейтрино в Стандартной модели элементарных частиц
2. Осцилляции нейтрино:
доказательство неполноты Стандартной модели
3. Нестандартные осцилляции:
новые типы нейтрино?
новые взаимодействия с веществом?
нарушение СРТ-инвариантности?
4. Измерение скорости нейтрино:
сверхсветовое движение?
5. Выводы

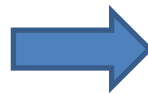
**Осцилляции нейтрино:
«нестандартные»**

(не описываются 3-мя типами нейтрино)

$$\Delta m_{12}^2 \ll \Delta m_{23}^2 \sim 2 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2.$$

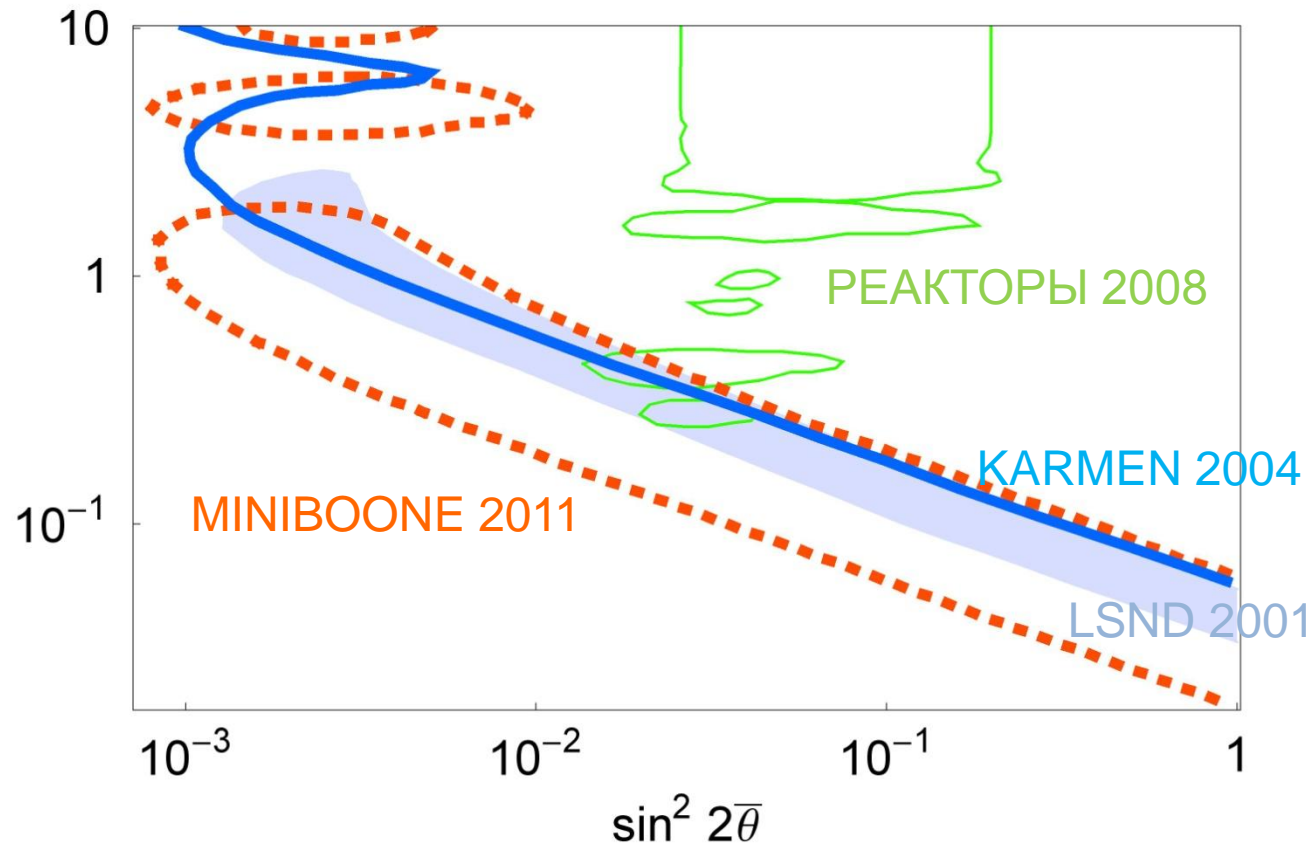
$$|\Delta m_{13}^2| = |\Delta m_{12}^2 - \Delta m_{23}^2| \sim \Delta m_{23}^2.$$

$$\Delta m_{ij}^2 \gg \Delta m_{23}^2$$



Осцилляции нейтрино: «нестандартные» (не описываются 3-мя типами нейтрино?)

$$\bar{\nu}_e \longleftrightarrow \bar{\nu}_\mu$$



$$\Delta m_{ij}^2 \gg \Delta m_{23}^2$$

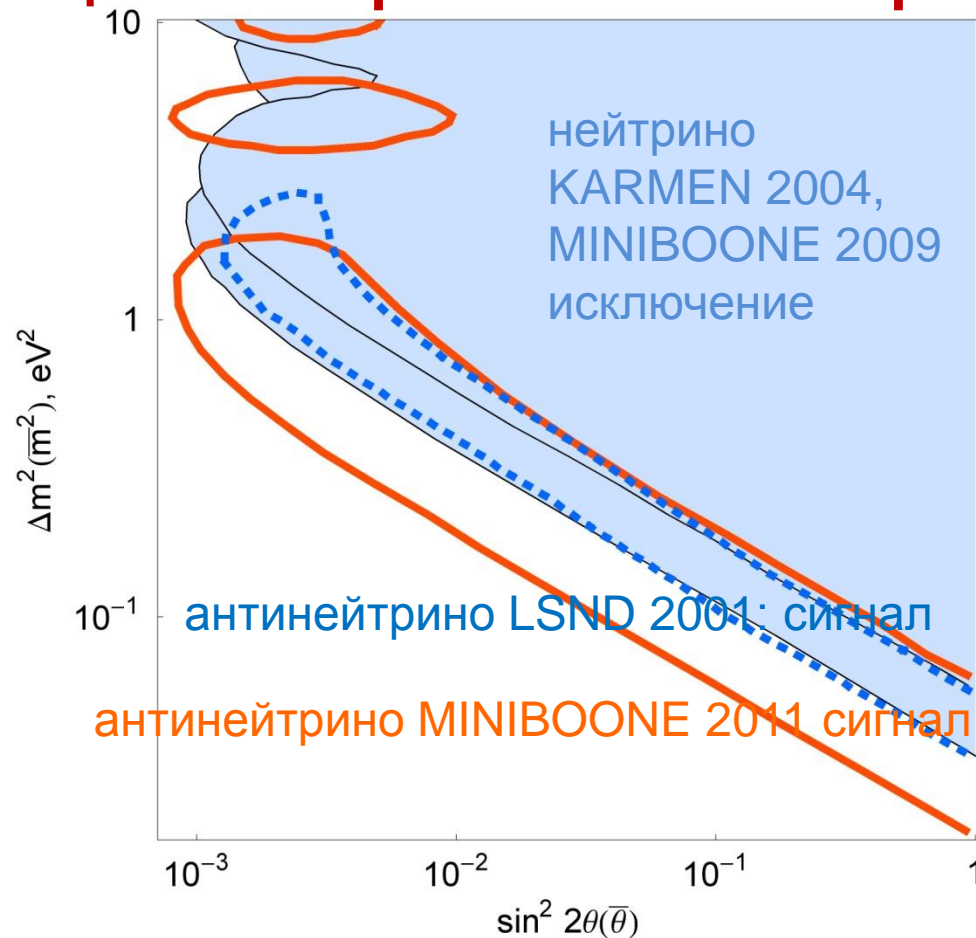
[также: калибровка
галлиевых детекторов]

Осцилляции нейтрино: «нестандартные»

(разница в осцилляциях нейтрино и антинейтрино?)

$$\nu_e \longleftrightarrow \nu_\mu$$

$$\bar{\nu}_e \longleftrightarrow \bar{\nu}_\mu$$



[также: калибровка галлиевых детекторов против реакторных экспериментов]

Осцилляции нейтрино: «нестандартные»

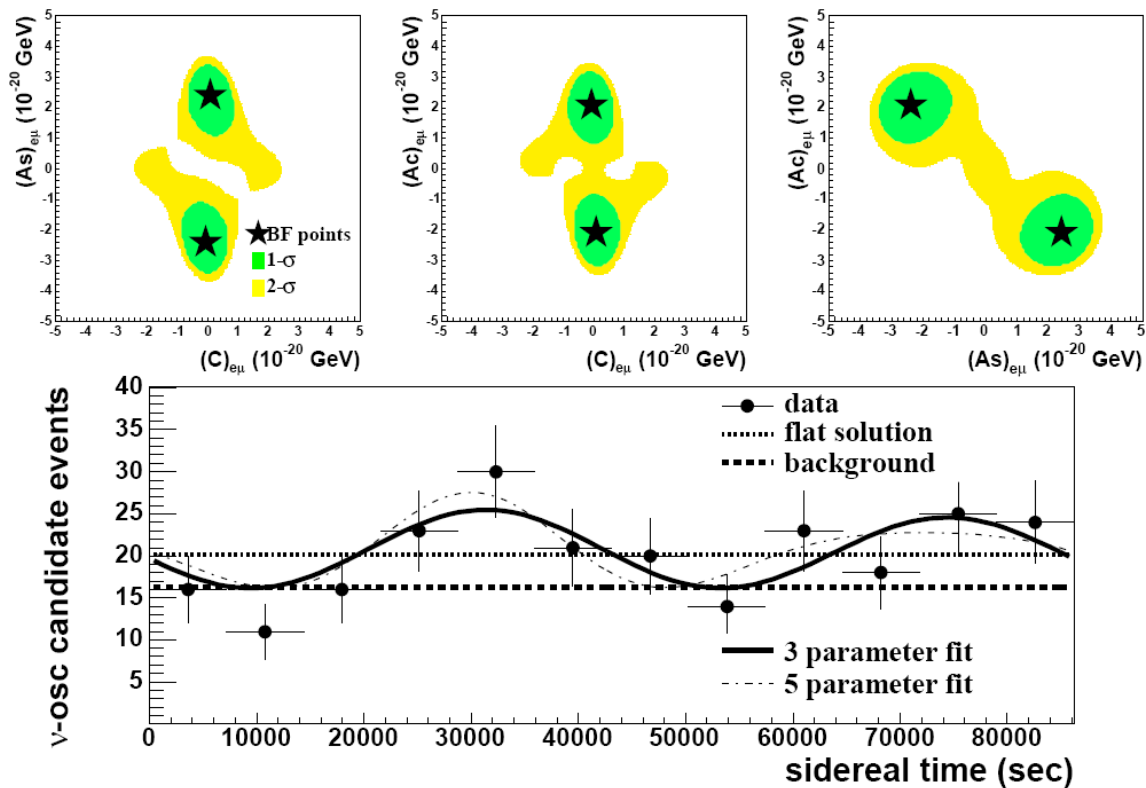
варианты объяснения:

- два дополнительных типа нейтрино
- нарушение CPT-инвариантности
 - CPT: фундаментальная симметрия
(3+1)-мерной Лоренц-инвариантной локальной
квантовой теории поля
- нестандартный взаимодействия с веществом,
различающие нейтрино и антинейтрино

Осцилляции нейтрино: «нестандартные» (сезонные вариации??)

MINIBOONE 2011

$$\bar{\nu}_e \longleftrightarrow \bar{\nu}_\mu$$



вариант объяснения:

- избранная система отсчета (нарушение Лоренц-инвариантности)

План:

1. Нейтрино в Стандартной модели элементарных частиц
2. Осцилляции нейтрино:
доказательство неполноты Стандартной модели
3. Нестандартные осцилляции:
новые типы нейтрино?
новые взаимодействия с веществом?
нарушение СРТ-инвариантности?
4. Измерение скорости нейтрино:
сверхсветовое движение?
5. Выводы

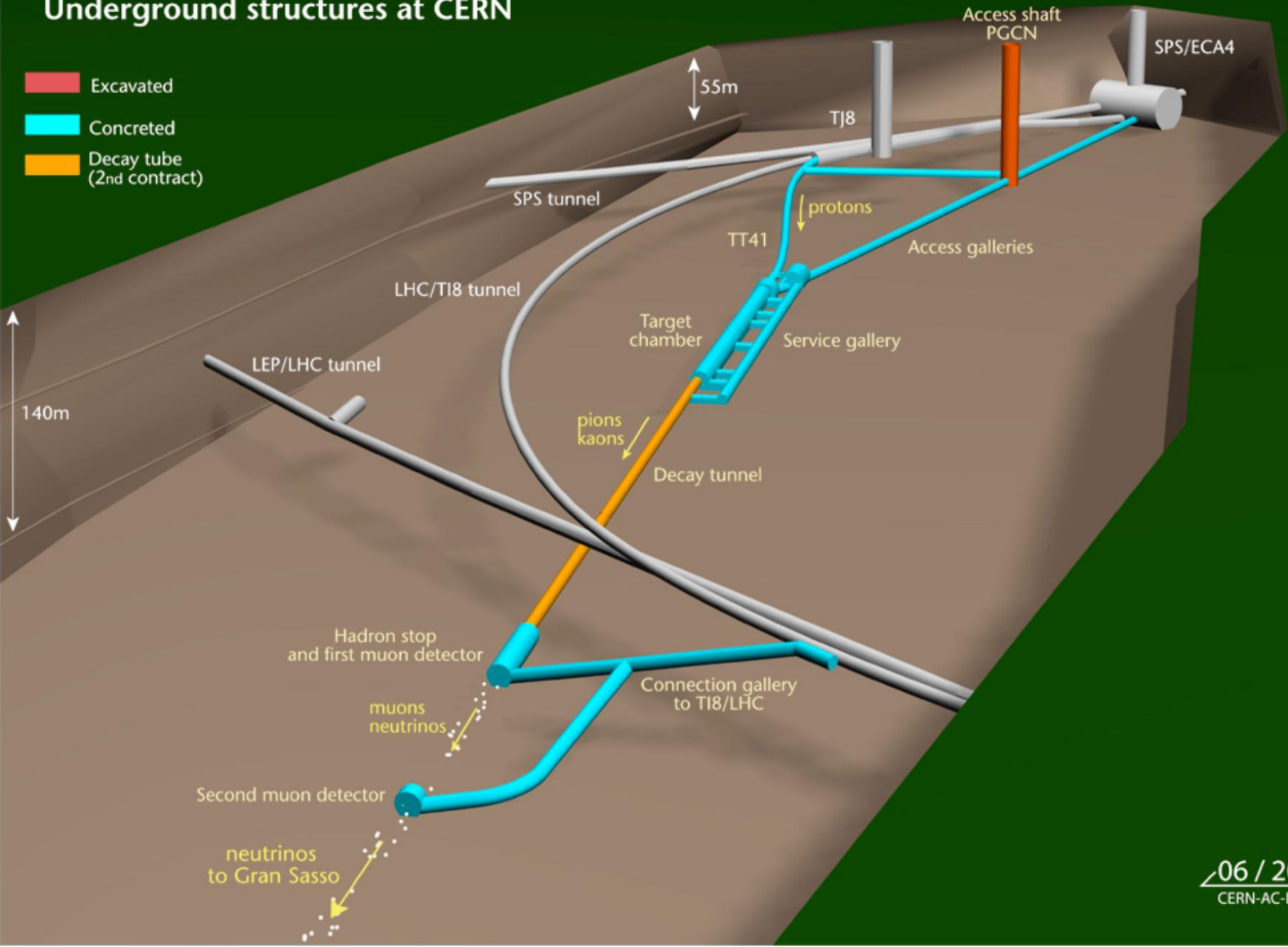
Измерение скорости нейтрино: **(вдруг больше скорости света??)**

- 1. Описание эксперимента коллаборации OPERA
(избранные моменты)
(слайды из семинара OPERA в ЦЕРН 26.09.2011)**
- 2. Другие экспериментальные ограничения на $v > c$**
- 3. Теоретический аргумент: распады сверхсветового нейтрино**

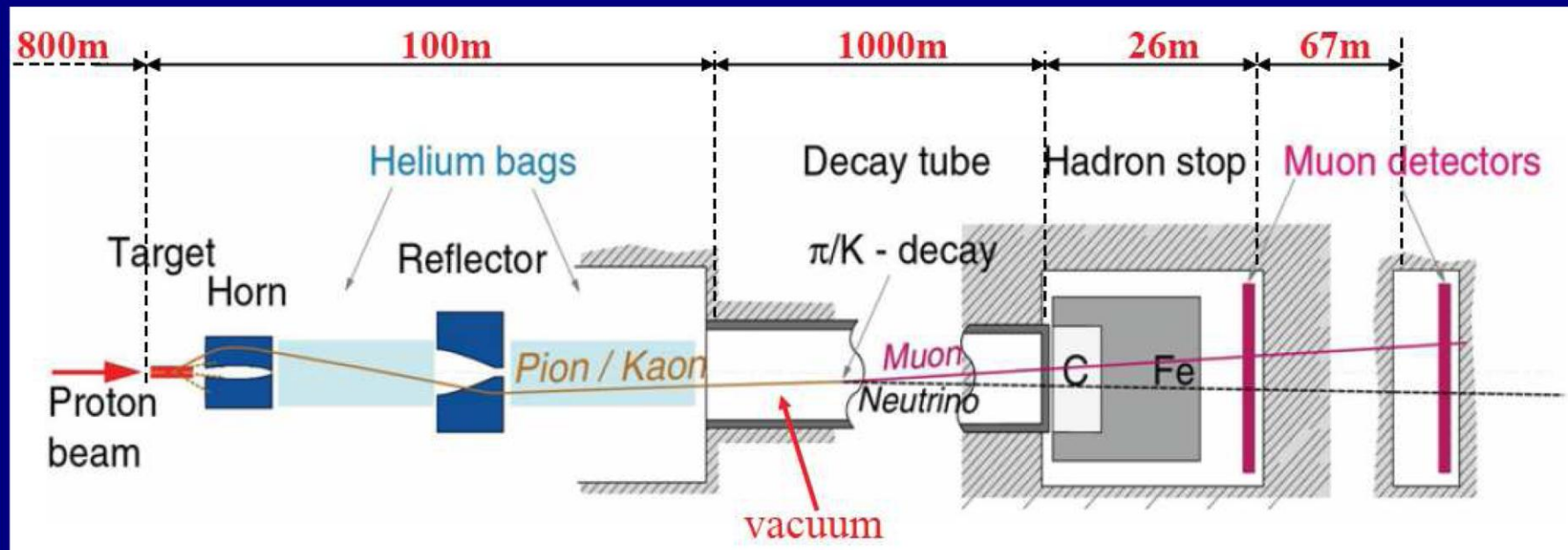
CERN NEUTRINOS TO GRAN SASSO

Underground structures at CERN

- Excavated
- Concreted
- Decay tube (2nd contract)

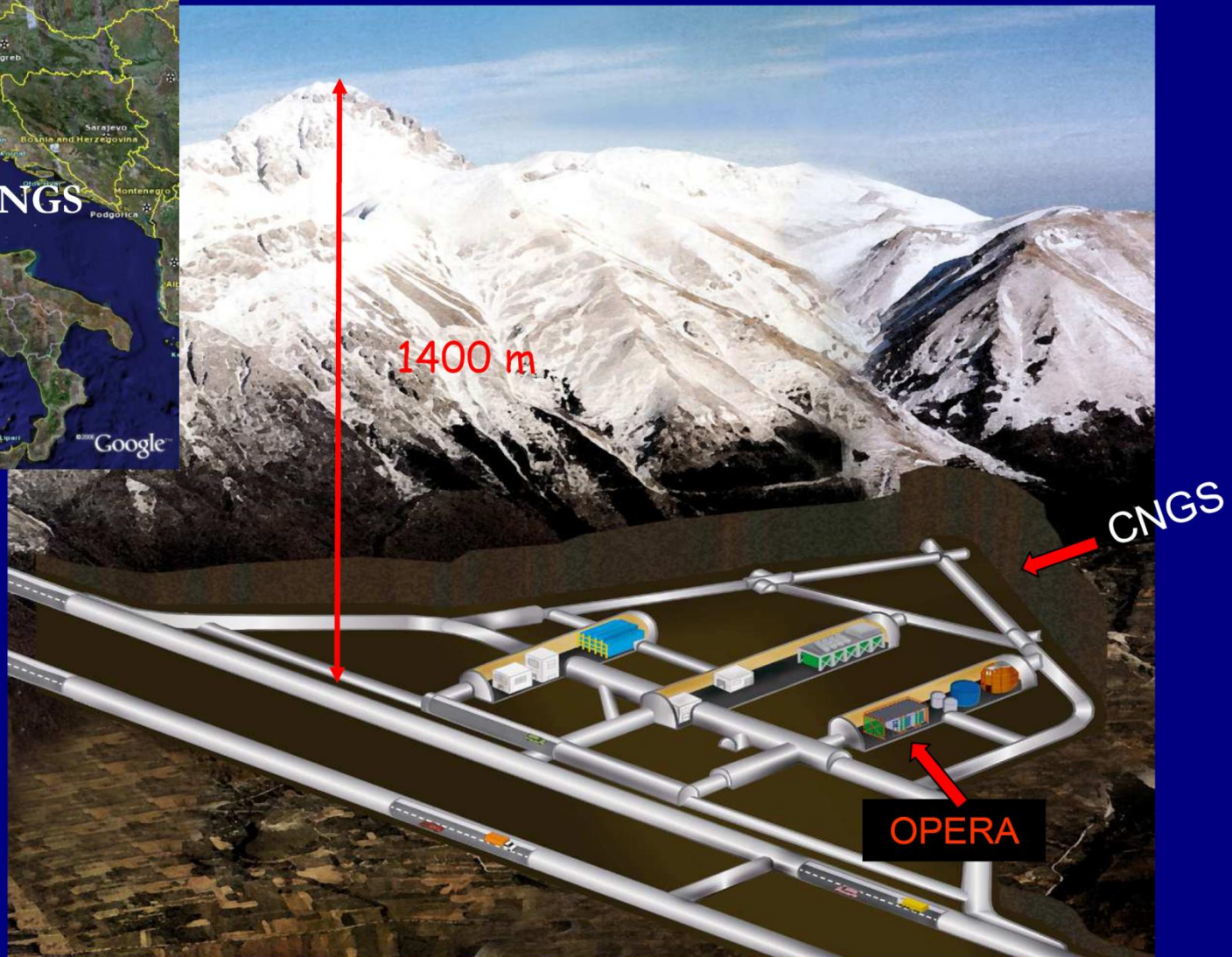


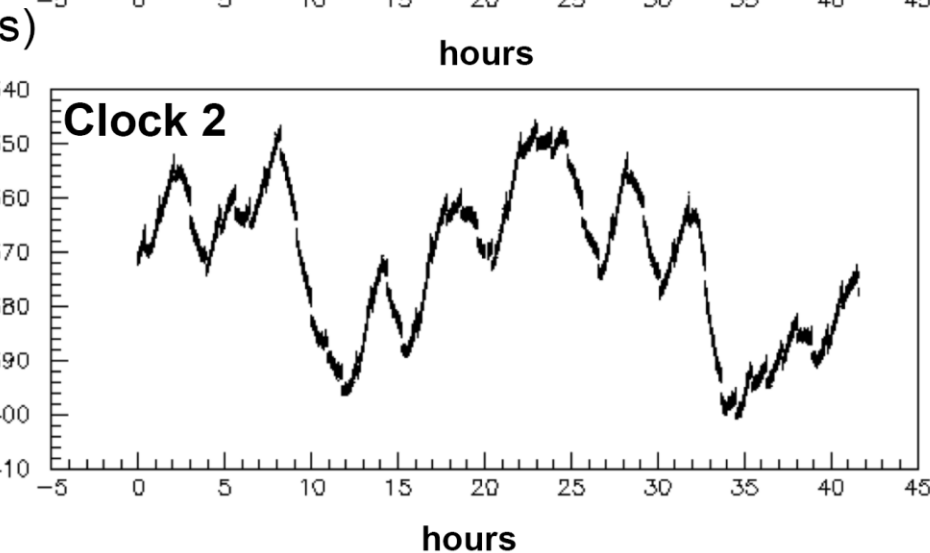
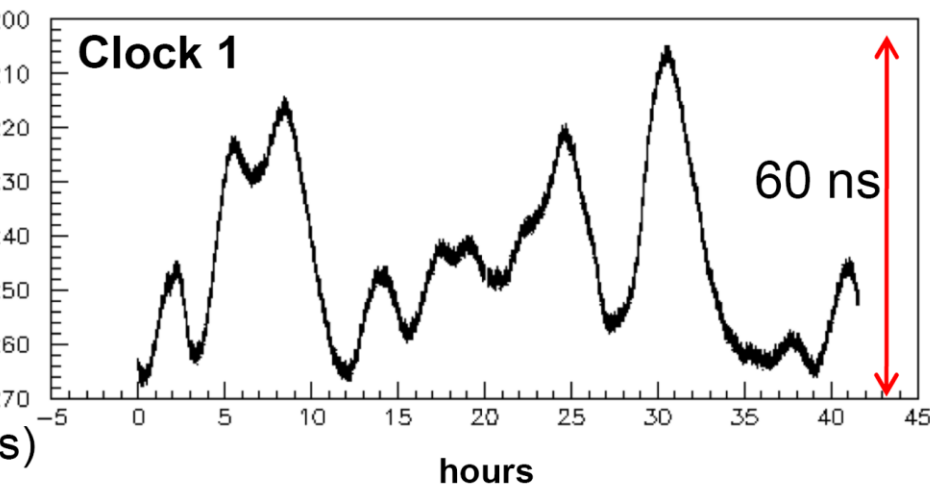
THE CNGS neutrino beam



- SPS protons: 400 GeV/c
- Cycle length: 6 s
- Two 10.5 μ s extractions (by kicker magnet) separated by 50 ms
- Beam intensity: $2.4 \cdot 10^{13}$ proton/extraction
- ~ pure muon neutrino beam ($\langle E \rangle = 17$ GeV) travelling through the Earth's crust

The LNGS underground physics laboratory





GPS clocks at LNGS w.r.t. Cs clock:

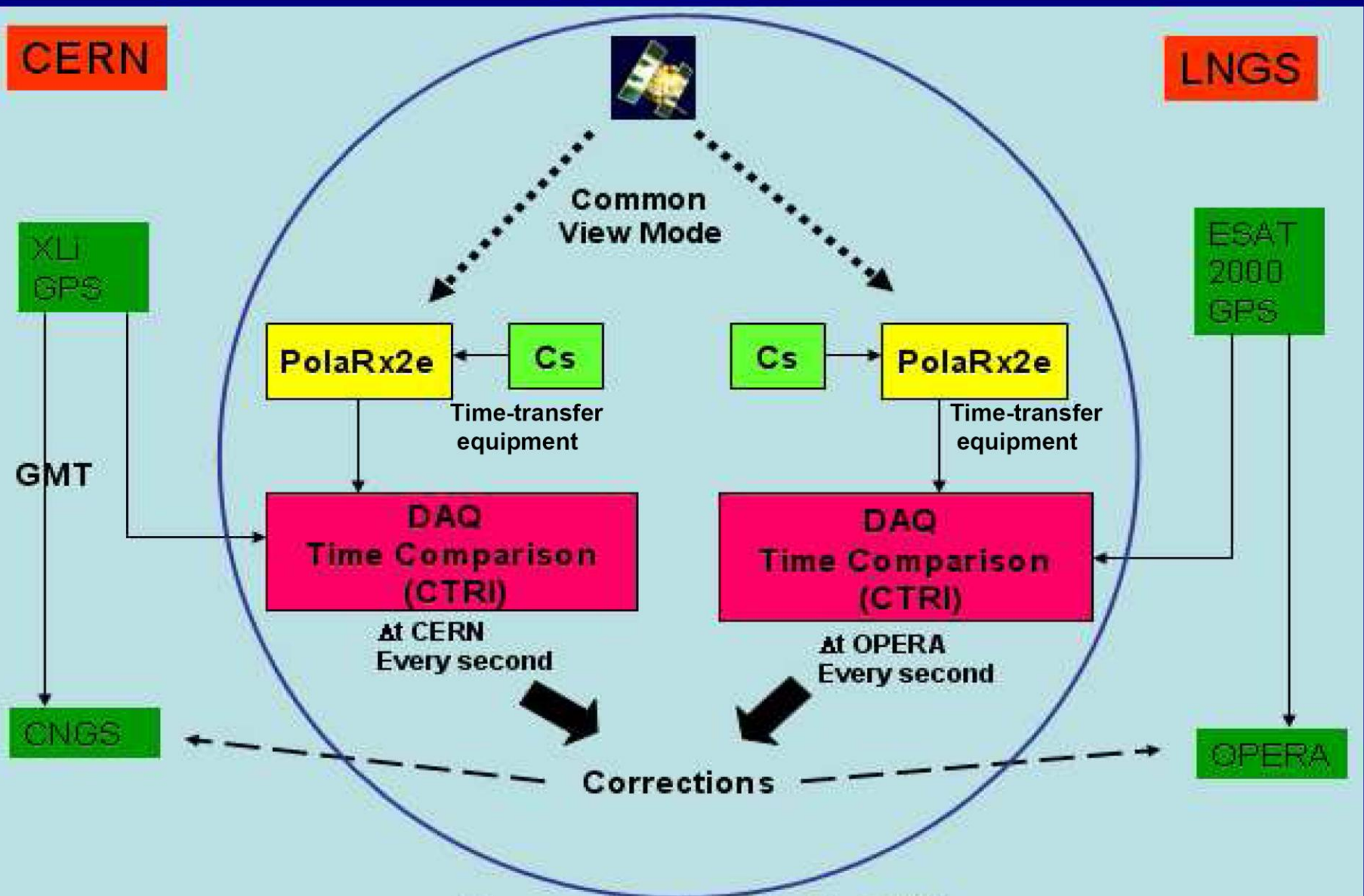
- 1) Large oscillations
- 2) Uncertainties on CERN-OPERA synchronisation

→ Need accurate time synchronisation system

Collaboration with CERN timing team since 2003

Major upgrade in 2008

CNGS-OPERA synchronization



GPS common-view mode

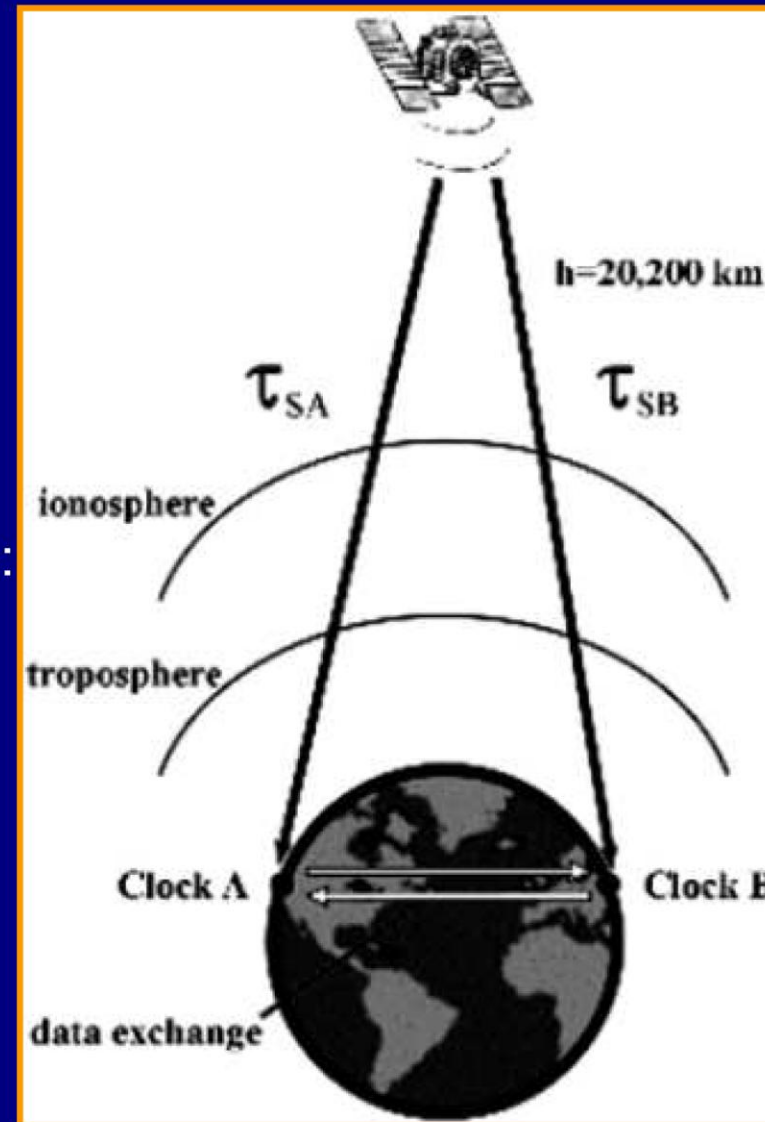
standard GPS operation:

resolves x, y, z, t with ≥ 4 satellite observations

Common-view mode (the same satellite for the two sites, for each comparison):

x, y, z known from former dedicated measurements:
determine time differences of local clocks (both sites) w.r.t. the satellite, by offline data exchange

$30 \text{ km} \ll 20000 \text{ km}$ (satellite height) \rightarrow similar paths in ionosphere

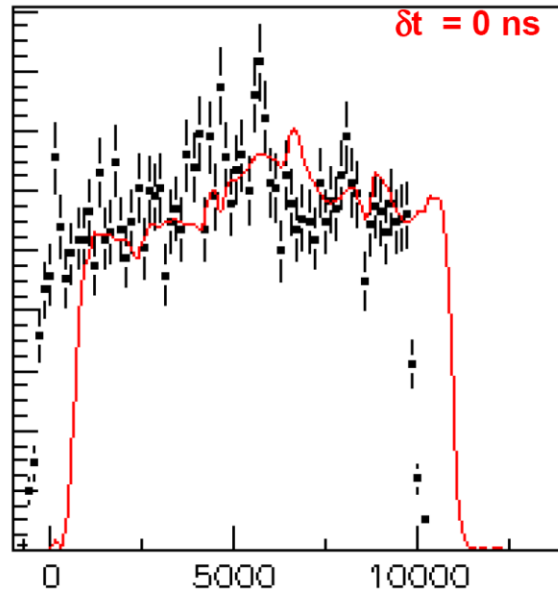


Delay calibrations summary

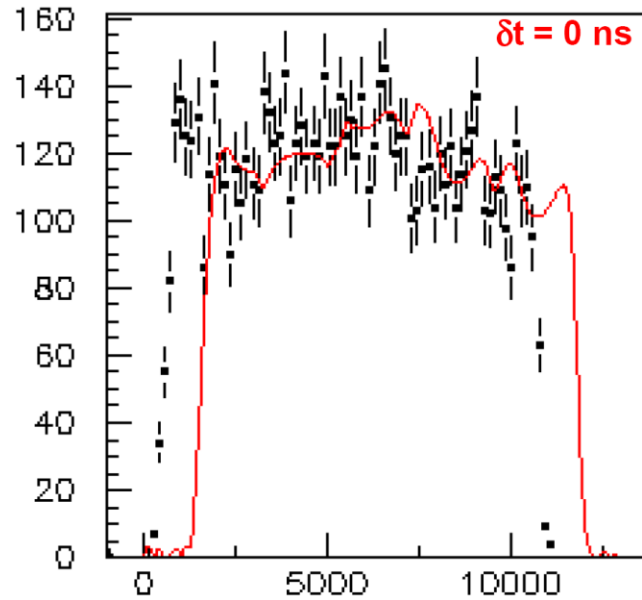
Item	Result	Method
CERN UTC distribution (GMT)	10085 ± 2 ns	<ul style="list-style-type: none"> • Portable Cs • Two-ways
WFD trigger	30 ± 1 ns	Scope
BTC delay	580 ± 5 ns	<ul style="list-style-type: none"> • Portable Cs • Dedicated beam experiment
LNGS UTC distribution (fibers)	40996 ± 1 ns	<ul style="list-style-type: none"> • Two-ways • Portable Cs
OPERA master clock distribution	4262.9 ± 1 ns	<ul style="list-style-type: none"> • Two-ways • Portable Cs
FPGA latency, quantization curve	24.5 ± 1 ns	Scope vs DAQ delay scan (0.5 ns steps)
Target Tracker delay (Photocathode to FPGA)	50.2 ± 2.3 ns	UV picosecond laser
Target Tracker response (Scintillator-Photocathode, trigger time-walk, quantisation)	9.4 ± 3 ns	UV laser, time walk and photon arrival time parametrizations, full detector simulation
CERN-LNGS intercalibration	2.3 ± 1.7 ns	<ul style="list-style-type: none"> • METAS PolaRx calibration • PTB direct measurement

Data vs PDF: before and after likelihood result

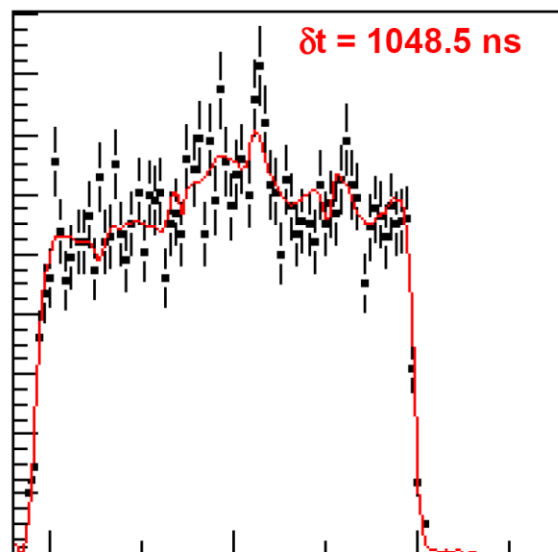
First extraction



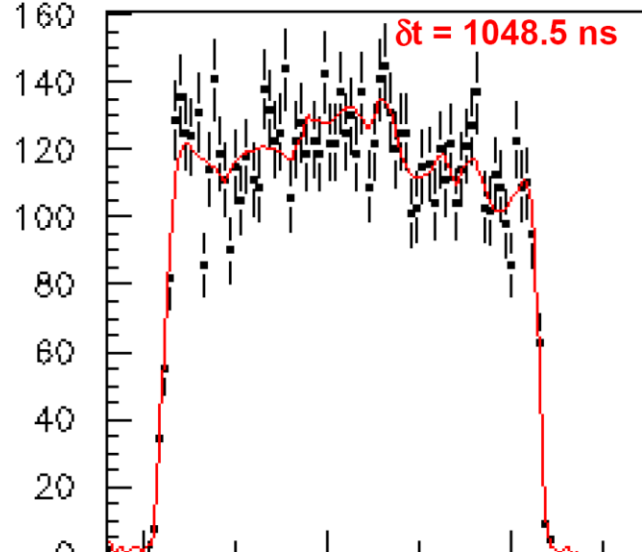
Second extraction



First extraction (ns)



Second extraction (ns)



(BLIND) $\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_v$

(1048.5 ± 6.9) ns (stat)

χ^2 / ndof :

first extraction: 1.06

second extraction: 1.12

Results

For CNGS ν_μ beam, $\langle E \rangle = 17$ GeV:

$$\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu =$$

$$(1048.5 \pm 6.9 \text{ (stat.)}) \text{ ns} - 987.8 \text{ ns} = (60.7 \pm 6.9 \text{ (stat.)} \pm 7.4 \text{ (sys.)}) \text{ ns}$$

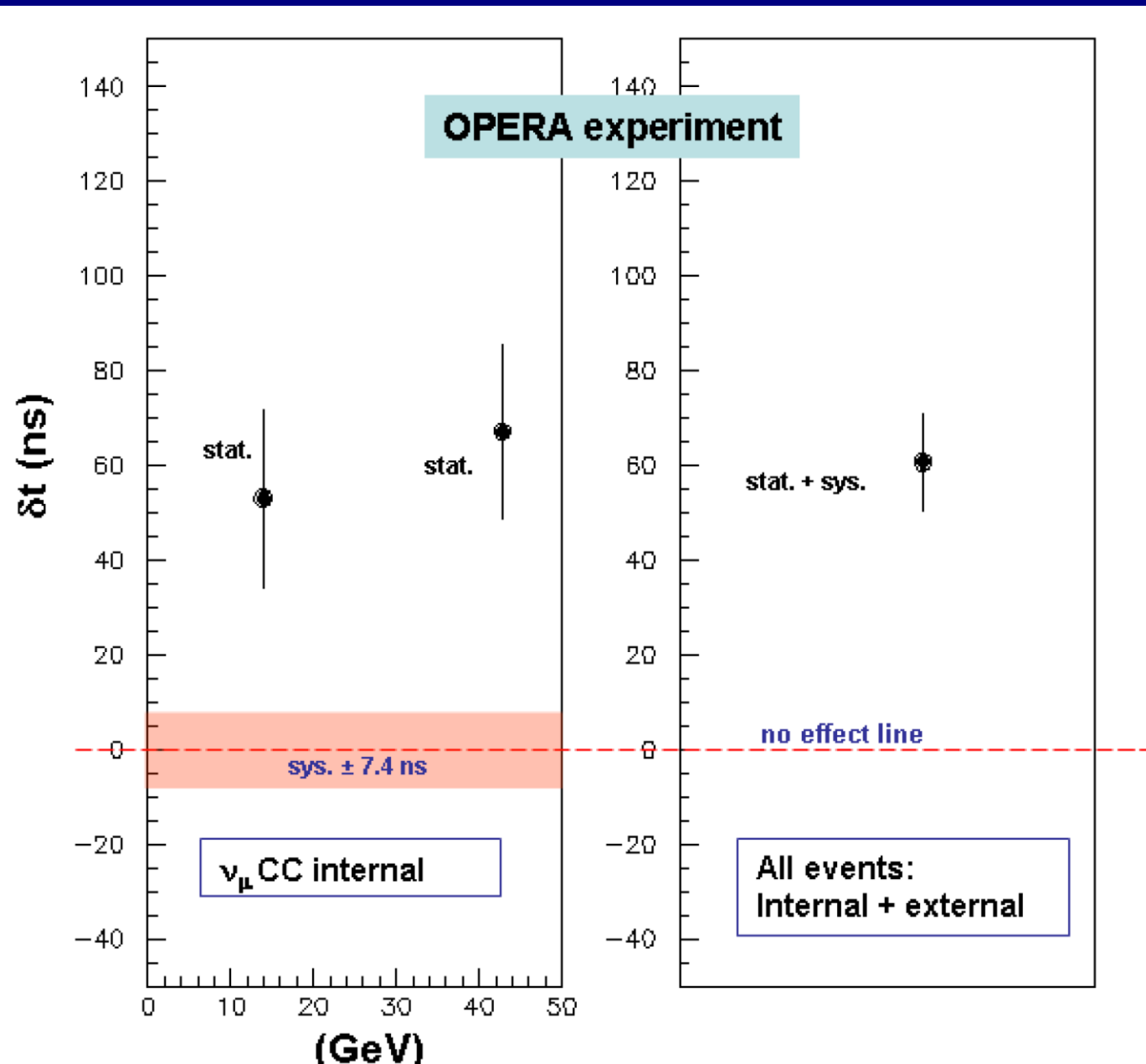
relative difference of neutrino velocity w.r.t. c :

$$(v-c)/c = \delta t / (\text{TOF}_c - \delta t) = (2.49 \pm 0.28 \text{ (stat.)} \pm 0.30 \text{ (sys.)}) \times 10^{-5}$$

(730085 m used as neutrino baseline from parent mesons average decay point)

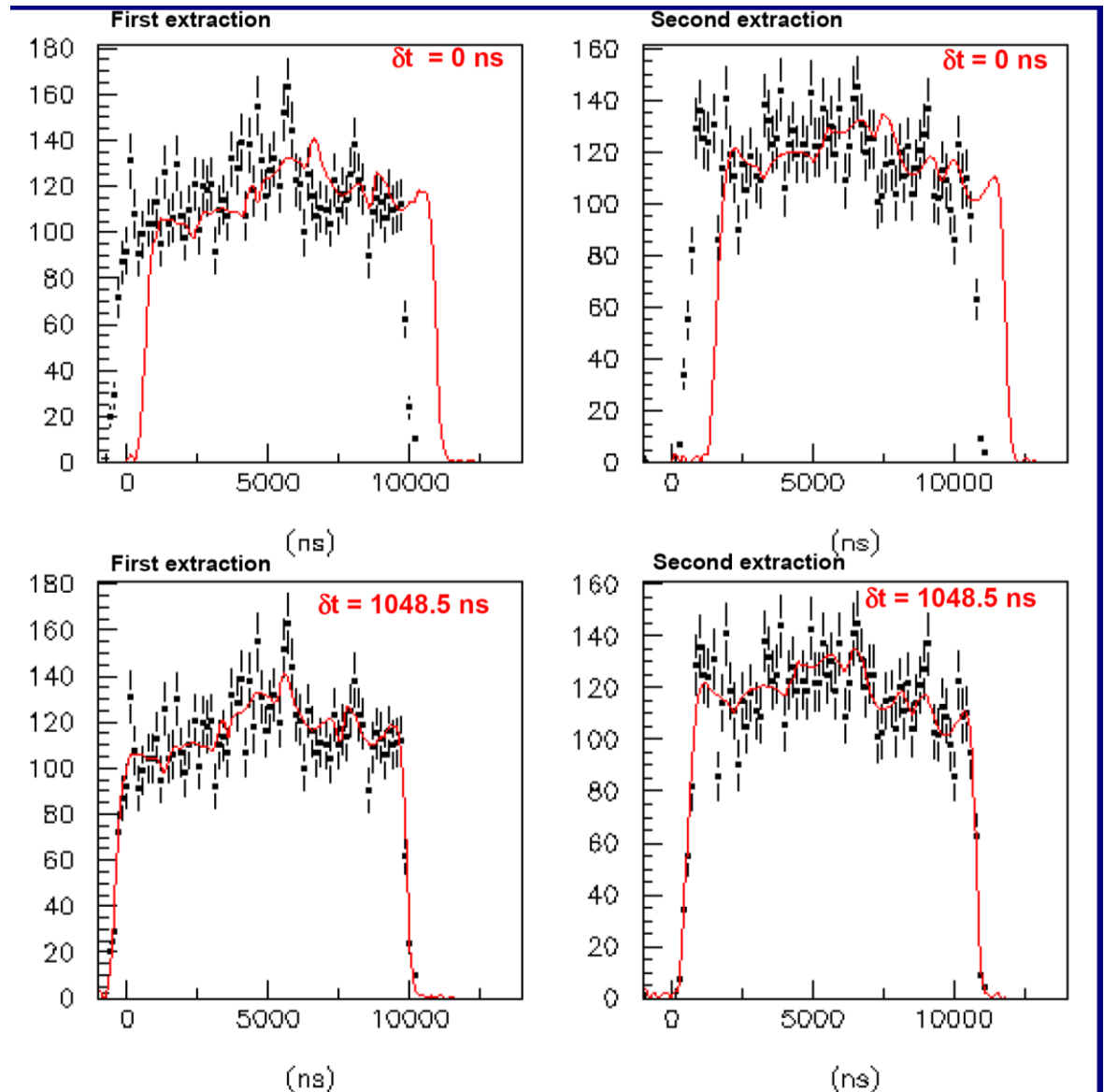
6.0 σ significance

No clues for energy dependence within the present sensitivity in the energy domain explored by the measurement



Измерение скорости нейтрино:

фитирование фронта = тонкий момент

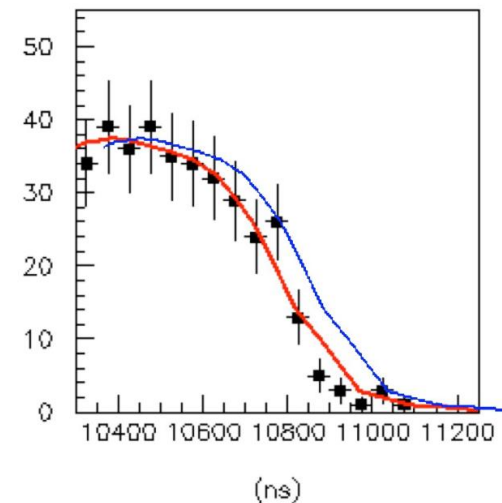
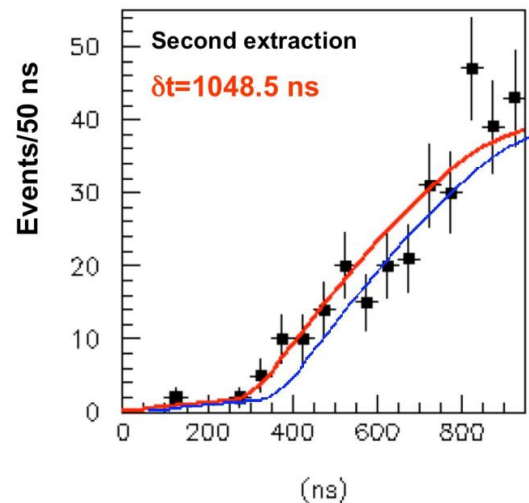
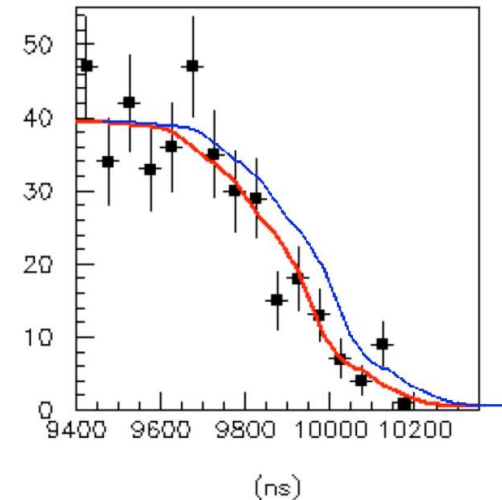
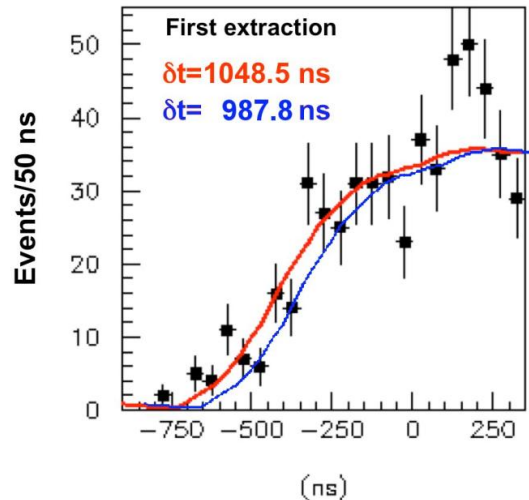


Измерение скорости нейтрино: фитирование фронта = тонкий момент

красный: $v > c$
(лучший фит)

синий: $v = c$

сверхсветовое
движение:
передний фронт,
большой вклад в χ^2 :
задний фронт



Скорость нейтрино: другие экспериментальные результаты

FNAL 1979

$E > 30$ ГэВ, мюонные нейтрино, $|v-c|/c < 4 \times 10^{-5}$

MINOS 2007

$\langle E \rangle = 3$ ГэВ (хвост до 100 ГэВ),
мюонные нейтрино, $(v-c)/c = (5.1 \pm 2.9) \times 10^{-5}$

OPERA 2011

$\langle E \rangle = 17$ ГэВ (хвост до 100 ГэВ),
мюонные нейтрино, $(v-c)/c = (2.49 \pm 0.28 \pm 0.30) \times 10^{-5}$

**Скорость нейтрино:
сверхновая 1987А**

Скорость нейтрино: сверхновая 1987А

Сверхновые звезды типа II:
коллапс ядра старой звезды,
большая часть энергии уносится нейтрино
(за несколько часов до видимой вспышки)
Детекторы «в режиме ожидания»



*Liquid Scintillator Detector (LSD)
под горой Монблан*

Скорость нейтрино: сверхновая 1987А

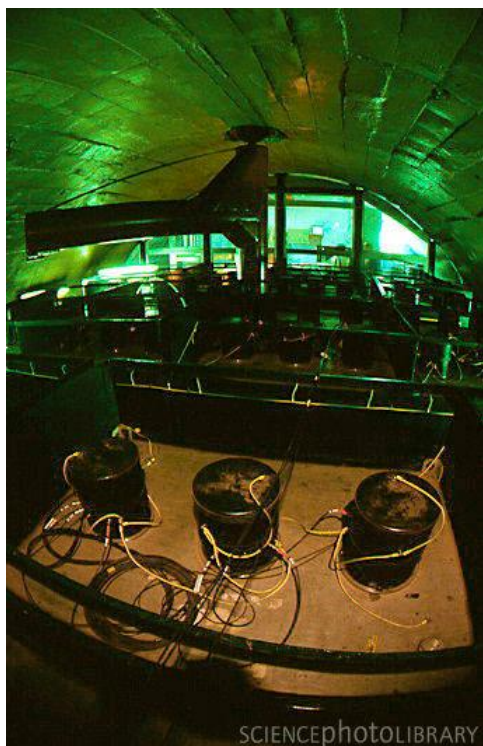
23 февраля 1987 г.



Скорость нейтрино: сверхновая 1987А

23 февраля 1987 г.

LSD 5 2:52:36,8
43,8



Скорость нейтрино: сверхновая 1987А

23 февраля 1987 г.

LSD 5 2:52:36,8
43,8



Скорость нейтрино: сверхновая 1987А

23 февраля 1987 г.

LSD	5	2:52:36,8
		43,8

KII	12	7:35:35
		47

IMB	8	7:35:41
		47

BUST	6	7:36:06
		21



Скорость нейтрино: сверхновая 1987А

23 февраля 1987 г.

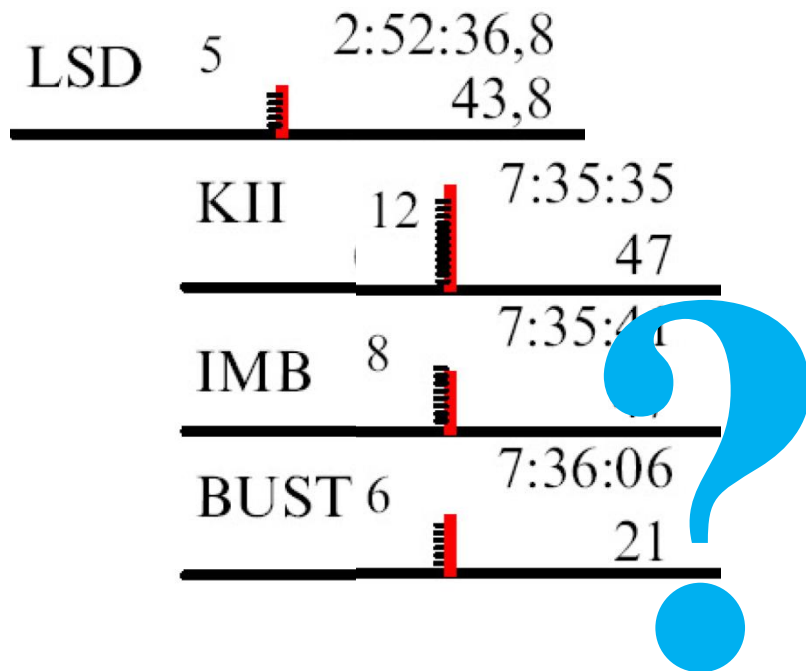
LSD	5	2:52:36,8	43,8
KII	12	7:35:35	47
IMB	8	7:35:41	47
BUST	6	7:36:06	21

10:38



Скорость нейтрино: сверхновая 1987А

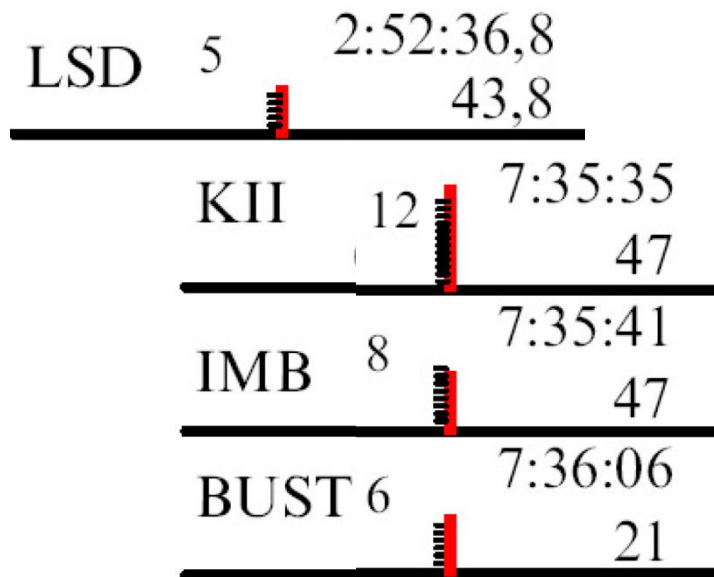
23 февраля 1987 г.



двойной нейтринный сигнал
не объяснен!

Скорость нейтрино: сверхновая 1987А

23 февраля 1987 г.



ограничения на ряд свойств нейтрино

- масса
- заряд
- параметры осцилляций
- магнитный момент
- **скорость движения**
- ...

OPERA 2011 : $(v - c)/c \sim 3 \times 10^{-5}$

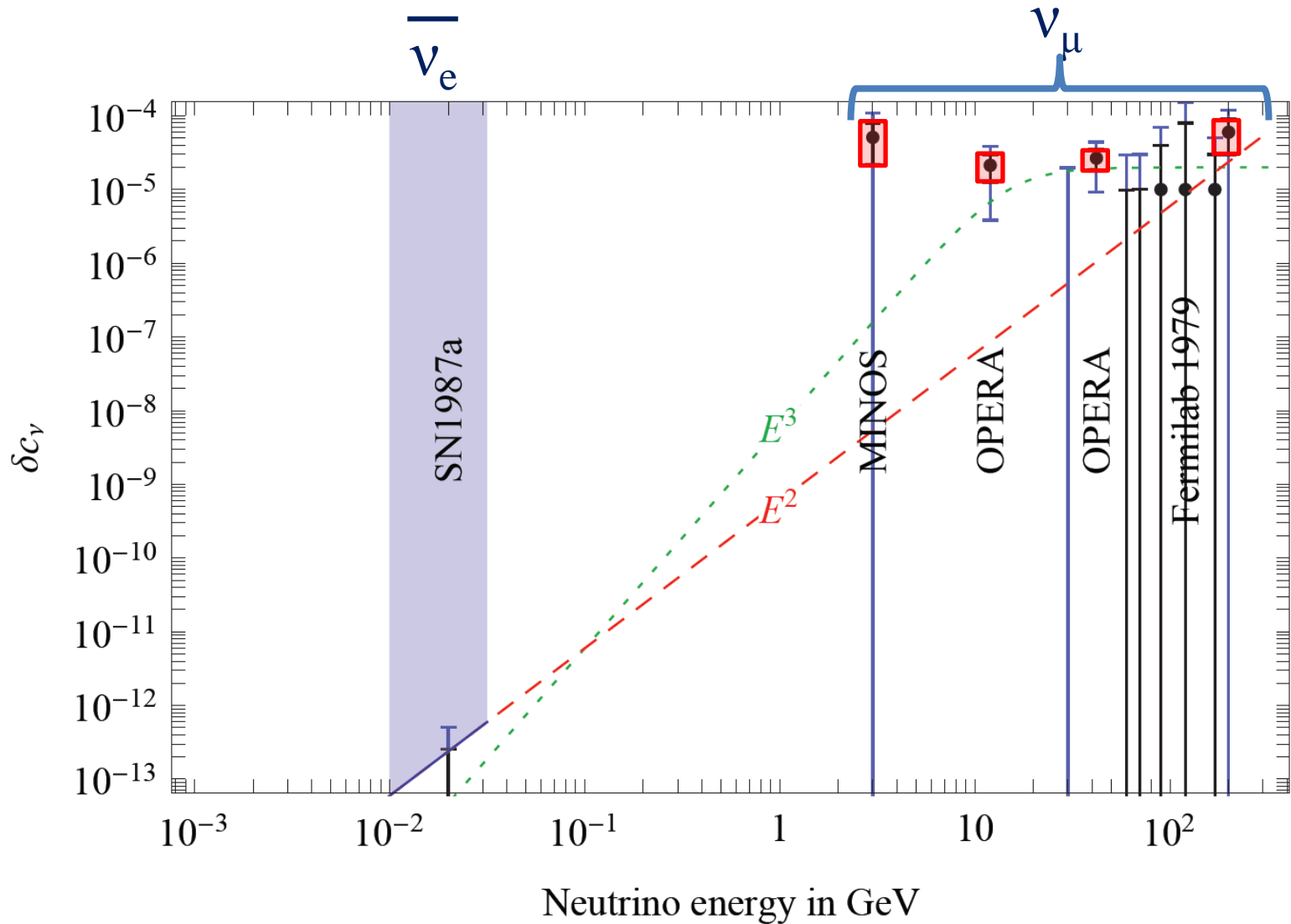
SN 1987A : $(v - c)/c < 3 \times 10^{-9}$



Скорость нейтрино: OPERA против SN1987A

- Другие энергии
- Другой тип нейтрино ($\nu_e - \nu_\mu$)
- Другое лептонное число (SN – в основном антинейтрино)
- Среда (камень – почти вакуум)

Скорость нейтрино: зависимость от энергии?

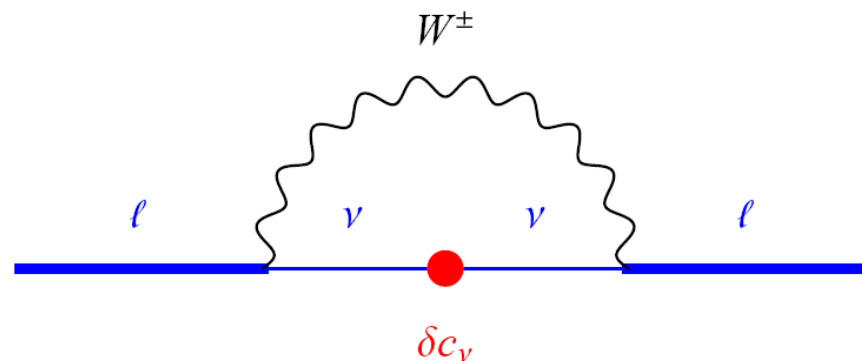


**Скорость нейтрино:
разные типы нейтрино?**

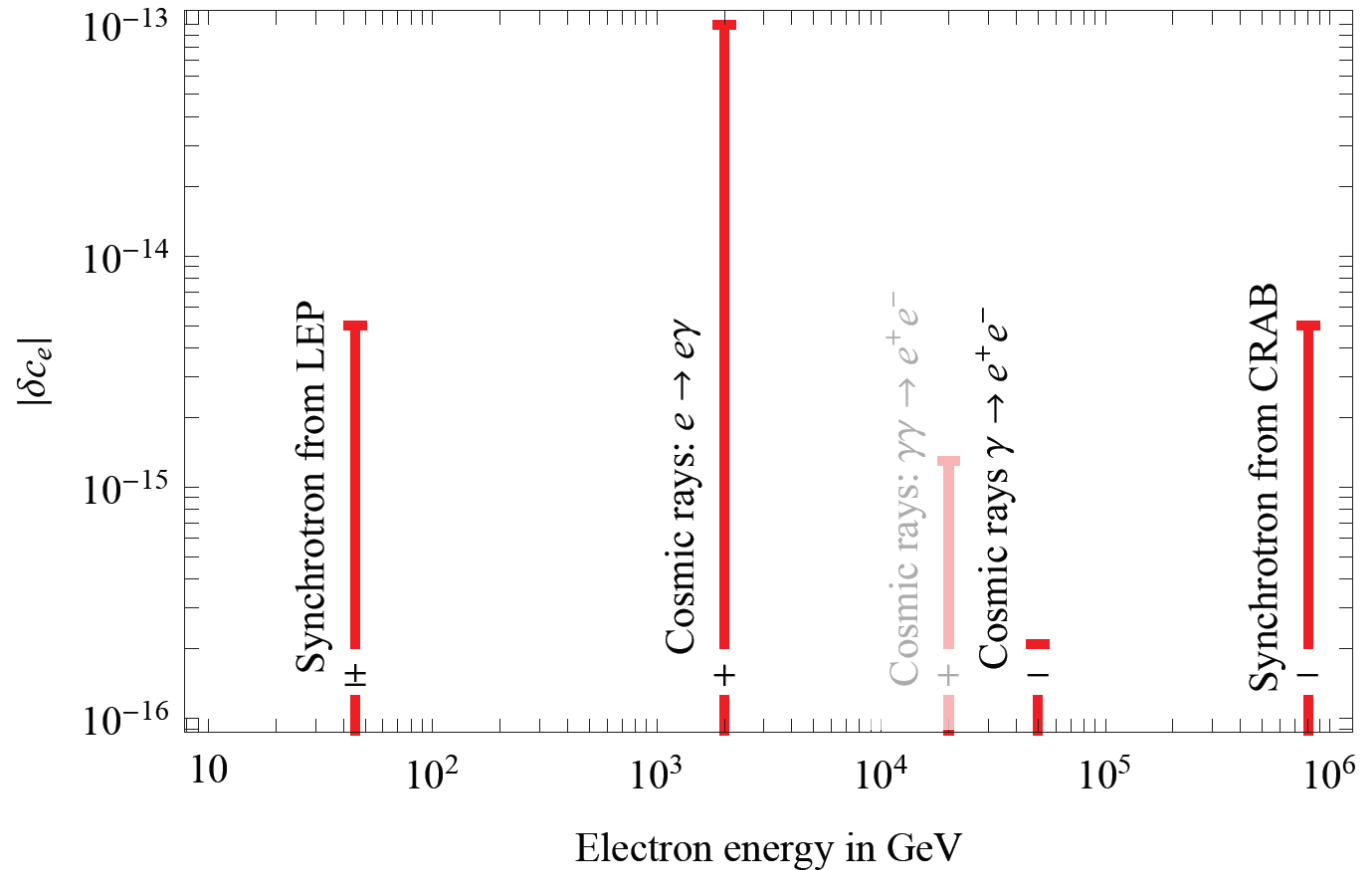
**факт нейтринных осцилляций на длинных дистанциях
указывает на равенство скоростей ν_e и ν_μ**

Скорость нейтрино: разные типы нейтрино? **электроны?**

- факт нейтринных осцилляций на длинных дистанциях указывает на равенство скоростей ν_e и ν_μ
- в Стандартной Модели при ненарушенной $SU(2)_W$ симметрии (>240 ГэВ) нейтрино и заряженный лептон – компоненты одного поля [ν_e – электрон]
- взаимодействие с W -бозоном «передает» нарушение Лоренц-инвариантности электрону при всех энергиях



Скорость нейтрино: разные типы нейтрино? **электроны?**



Скорость нейтрино: влияние на вероятности процессов

становятся кинематически разрешенными процессы,
запрещенные в релятивистской квантовой теории поля,
в частности

$$\nu \rightarrow \nu e^+ e^-$$

модифицируется вероятность рождения нейтрино
в распадах мезонов

Скорость нейтрино:

влияние на вероятности процессов

$$\nu \rightarrow \nu e^+ e^-$$

интенсивные потери энергии при $E > 12$ ГэВ
(OPERA: $\langle E \rangle = 17$ ГэВ)

Скорость нейтрино:

влияние на вероятности процессов

$$\nu \rightarrow \nu e^+ e^-$$

интенсивные потери энергии при $E > 12$ ГэВ

(OPERA: $\langle E \rangle = 17$ ГэВ)

(рождение пар не наблюдает ICARUS)

предположения:

- простейшая модификация дисперсионных соотношений
 - электрон и позитрон = асимптотические состояния
 - сохранение 4-импульса (нет «утечки»)
 - электроны не сверхсветовые

Скорость нейтрино:

влияние на вероятности процессов

модифицируется вероятность рождения нейтрино
в распадах мезонов

нейтрино с $E > 5$ ГэВ не рождаются!

(OPERA: $\langle E \rangle = 17$ ГэВ)

(ICECUBE: $E = 400$ ТэВ)

Скорость нейтрино:

ВЫВОДЫ

- Экспериментальный результат OPERA представляется «аккуратным» (не поймали за руку)
- Он не противоречит результатам аналогичных экспериментов
- Теоретически, его очень трудно одновременно согласовать с:
 - ✓ ограничениями из сверхновой 1987A
 - ✓ ограничениями на максимальную скорость электронов
 - ✓ отсутствием сильных потерь энергии в процессе $\nu \rightarrow \nu e^+ e^-$
- Самосогласованная количественная модель отсутствует, но не запрещена

Перспективы проверки:

- OPERA с короткими «пачками» нейтрино (1-2 нс каждые 500 нс), 2011?
- MINOS (ближний и дальний нейтринные детекторы!) 2012?

План:

1. Нейтрино в Стандартной модели элементарных частиц
2. Осцилляции нейтрино:
доказательство неполноты Стандартной модели
3. Нестандартные осцилляции:
новые типы нейтрино?
новые взаимодействия с веществом?
нарушение СРТ-инвариантности?
4. Измерение скорости нейтрино:
сверхсветовое движение?
5. Выводы

Нейтрино и «новая физика»:

ВЫВОДЫ

- **Осцилляции нейтрино** – единственный достоверный экспериментальный результат в физике частиц, не объясняемый Стандартной моделью
- Отдельные результаты указывают на возможное существование неизвестных типов нейтрино и/или разницу в осцилляциях нейтрино и антинейтрино (CPT?).
- Отдельные результаты, требующие независимой экспериментальной проверки, указывают на скорость движения нейтрино, превышающую скорость света в вакууме. Теоретически их трудно согласовать с другими экспериментальными результатами.