

Аннотация цикла работ «**Исследования нейтрино в эксперименте OPERA**» на конкурс научно-исследовательских экспериментальных работ ОИЯИ

Коллектив авторов:

Васина С.Г., Горнушкин Ю.А., Дмитриевский С.Г., Крумштейн З.В.,
Наумов Д.В., Ольшевский А.Г., Садовский А.Б., Сотников А.П.,
Чуканов А.В., Шешуков А.В.

NEUTRINO'98

**XVIII INTERNATIONAL CONFERENCE
ON
NEUTRINO PHYSICS AND ASTROPHYSICS**
Takayama, Japan - June 4-9, 1998

INTERNATIONAL ADVISORY COMMITTEE

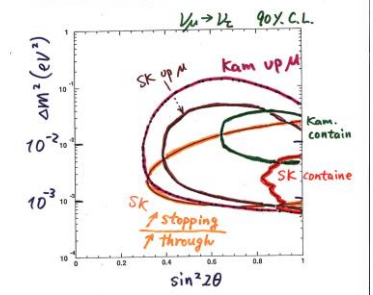
- J. Bahcall (IAS)
- E. Boehm (Caltech)
- A. Dar (Tashkent)
- E. Fiorini (INFN, Milan)
- F. Halzen (Wisconsin)
- M. Kobayashi (Tokyo)
- G. Marx (Budapest)
- E. Moniakshi (Gran Sasso)
- L. Okun (Moscow)
- M. Rons (Helsinki)
- B. Sadoulet (Berkeley)
- J. Steinberger (CERN)
- S. Weinberg (Austin)
- S. Wojcicki (Stanford)
- B. Barish (Caltech)
- J. Cronin (Chicago)
- J. Ellis (CERN)
- S. Glashow (Harvard)
- T. Kawan (Helsinki)
- L. Lederman (Fermilab)
- A. McDonald (Queens)
- A. Morales (Zaragoza)
- F. Reines (Irvine)
- C. Rubbia (CERN)
- J. Schneps (Turk)
- E. Vannucci (Paris)
- K. Winter (CERN)
- G. Zatsarin (Moscow)

Attendance by invitation

Further information:
URL: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/nu98/>
E-mail: nu98@suketto.icrr.u-tokyo.ac.jp

Supported by
- International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP)
- Japan National Committee for Physics,
Science Council of Japan

Summary
Evidence for ν_μ oscillations



- $\begin{cases} \sin^2 2\theta > 0.8 \\ \Delta m^2 \sim 10^{-3} \sim 10^{-2} \end{cases}$

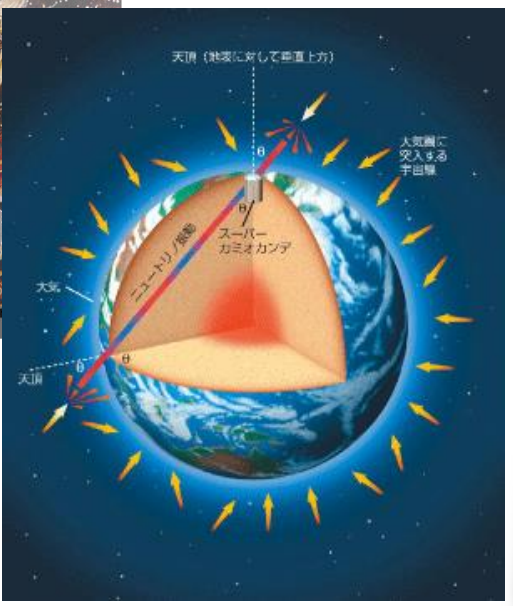
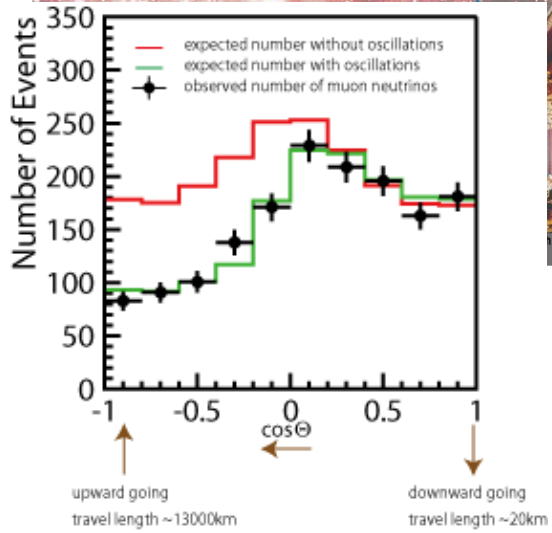
(• $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ or $\nu_\mu \rightarrow \nu_s$?)

$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ VS $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_s$ solutions for atmospheric ν

O. YASUDA
(Tokyo Metropolitan Univ.)

1. Introduction

* Recent SK atmospheric ν data \rightarrow $\left\{ \begin{array}{l} \nu \text{ oscil. w/} \\ 10^{-3} \text{ eV}^2 \lesssim \Delta m^2 \lesssim 10^{-2} \text{ eV}^2 \\ \sin^2 2\theta \approx 1 \\ \nu_\mu \leftrightarrow \nu_e \text{ isn't a} \\ \text{good fit} \end{array} \right.$



4. Conclusions

So far both $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ & $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_s$ solutions provide a good fit to atmospheric neutrino anomaly for $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-3} \text{ eV}^2 \lesssim |\Delta m^2| \lesssim 10^{-2} \text{ eV}^2 \\ \sin^2 2\theta \sim 1 \end{array} \right.$

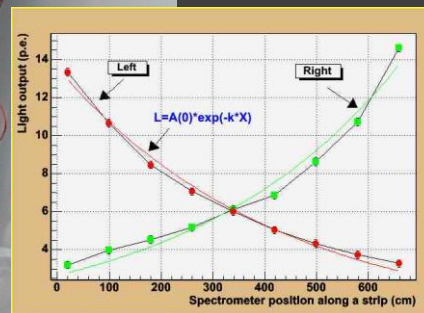
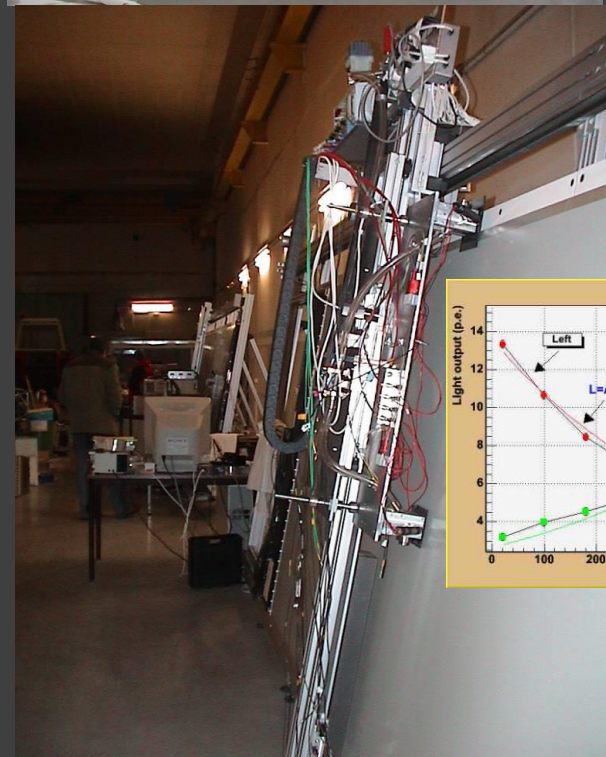
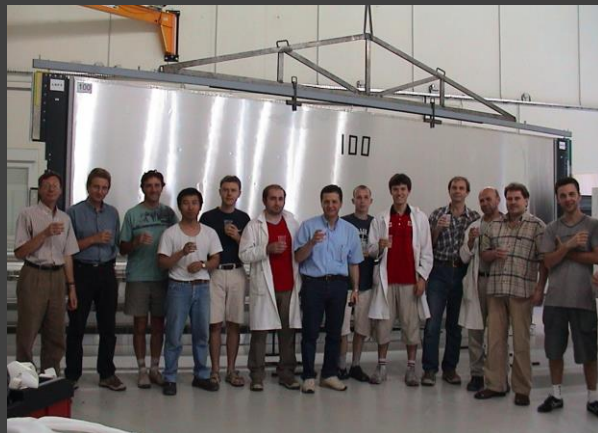
To be more conclusive, we need more statistics or we have to look for appearance of ν_τ in long baseline experiments.

Участники проекта OPERA: 2001-2021

Васина С.Г., Гончар М.О., Горнушкин Ю.А., Дмитриевский С.Г., Красин И.Е.,
Красноперов А.В., Крумштейн З.В., Лазарев А.Б., Ломидзе Д., Марьин И.И.,
Наумов Д.В., Ноздрин А.А., Ольшевский А.Г., Ососков Г.А., Пороховой С.Ю.,
Писарев И.Л., Садовский А.Б., Сазонов С.А., Сердюк В.З., Сидоркин В.В.,
Смольников А.В., Сотников А.П., Терещенко В.В., Терещенко С.В., Хованский Н.Н.,
Чуканов А.В., Шаденко В.П., Шешуков А.В., Шилов С.Н., и другие

Основные направления работы группы ОИЯИ, отраженные в научных статьях, включенных в ЦИКЛ:

- Создание Target Tracker детектора
- Анализ данных ТТ
- Анализ данных и получение результатов по $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$
- Анализ данных и получение результатов по $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$
- Создание портала OPERA по программе CERN OpenData



Создание Target Tracker детектора

Группа ОИЯИ активно участвовала в создании Target Tracker'a (ТТ): изготовление сцинтилляционных стрипов, сборка модулей и их калибровка во Франции, сборка всего детектора в Гран Сассо. Более 20 человек из ЛЯП и, частично, из других лабораторий принимали участие в этих работах. Общая площадь ТТ составляет 6200м², 34000 каналов ФЭУ

The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam
R. Acquafredda et al. JINST 4 (2009) P04018 - 289 citations

The OPERA experiment target tracker
T. Adam et al., NIM.A 577 (2007) 523-539 - 93 citations

Анализ данных ТТ

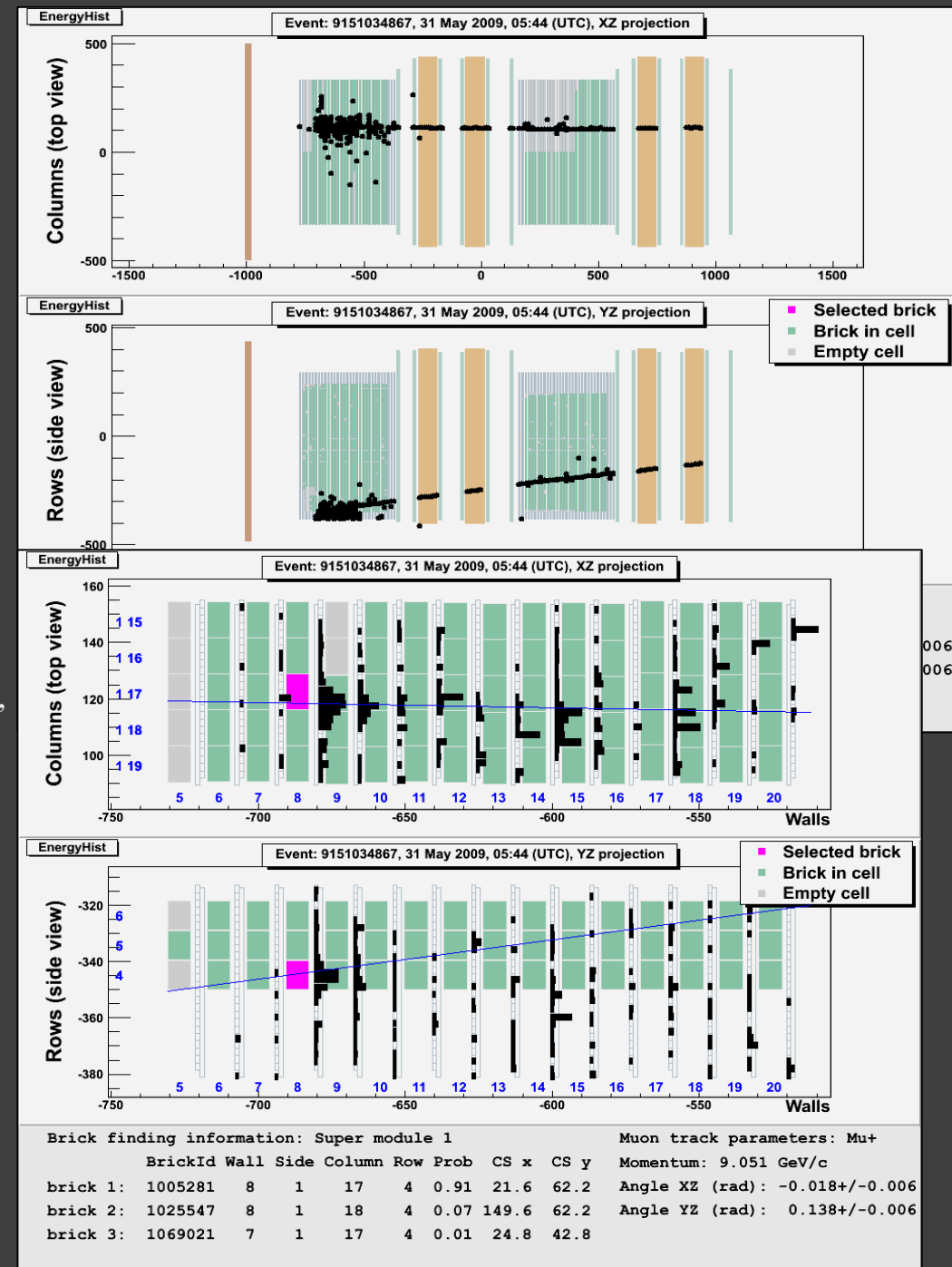
- После создания детектора группа ОИЯИ создала собственный пакет обработки данных ТТ для поиска вершин событий в детекторе OPERA. Программа оказалась более эффективной, по сравнению с написанной другой группой ранее, позволяла делать анализ значительно быстрее, а входящий в нее интерфейс (“event-display”) был намного более информативным и функциональным.
- Группа ОИЯИ была ответственной за анализ данных ТТ и поиск вершин нейтринных событий на протяжении почти всего эксперимента.

Locating the neutrino interaction vertex with the help of electronic detectors in the OPERA experiment Yu.A. Gornushkin, S.G. Dmitrievsky, A.V. Chukanov Phys.Part.Nucl.Lett. 12 (2015) 1, 89-99 - 5 citations

Study of neutrino interactions with the electronic detectors of the OPERA Experiment N. Agafonova (Moscow, INR) et al. New J.Phys. 13 (2011) 053051 - 74 citations

Measurement of the atmospheric muon charge ratio with the OPERA detector N. Agafonova et al. (2010) Eur.Phys.J.C 67 (2010) 25-37 - 67 citations

Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam T. Adam et al. JHEP 10 (2012) 093 • e-Print: 1109.4897 [hep-ex] - 429 citations



Открытие осцилляций ν_μ - ν_τ



PRL 115, 121802 (2015)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
18 SEPTEMBER 2015



Discovery of τ Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment

Channel	Expected background			Expected signal	Observed
	Charm	Had. reinterac.	Large μ scat.		
$\tau \rightarrow 1h$	0.017 ± 0.003	0.022 ± 0.006		0.52 ± 0.10	3
$\tau \rightarrow 3h$	0.17 ± 0.03	0.003 ± 0.001		0.73 ± 0.14	1
$\tau \rightarrow \mu$	0.004 ± 0.001		0.0002 ± 0.0001	0.61 ± 0.12	1
$\tau \rightarrow e$	0.03 ± 0.01			0.78 ± 0.16	0
Total	0.22 ± 0.04	0.02 ± 0.01	0.0002 ± 0.0001	0.25 ± 0.05	5



Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2015

NEUTRINO OSCILLATIONS

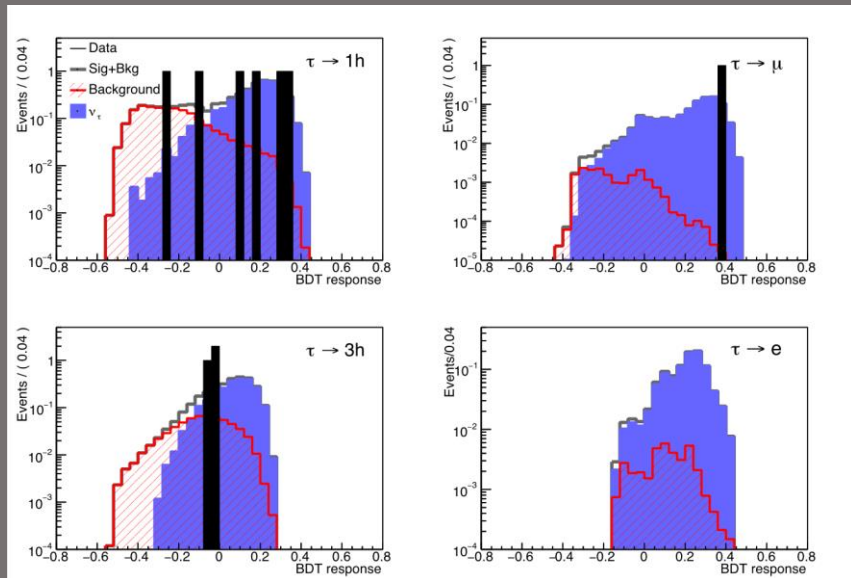
compiled by the Class for Physics of the Royal Swedish Academy of Sciences

Strong cut selection for background suppression

With significance 5.1σ a **discovery of ν_μ - ν_τ oscillations was reported**

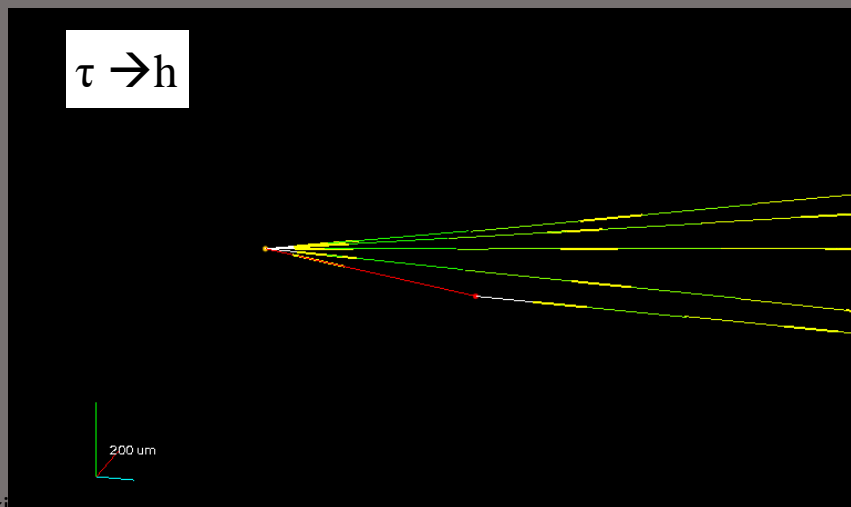
Super-Kamiokande's oscillation results were later confirmed by the detectors MACRO [55] and Soudan [56], the long-baseline accelerator experiments K2K [57], MINOS [58] and T2K [59] and more recently also by the large neutrino telescopes ANTARES [60] and IceCube [61]. Appearance of tau-neutrinos in a muon-neutrino beam has been demonstrated on an event-by-event basis by the OPERA experiment in Gran Sasso, with a neutrino beam from CERN [62].

In 2018, with full data set and in relaxed kinematic parameters space improved separation of signal and background events was performed by MultiVariate Analysis - Boosted Decision Trees algorithm. 5 more events found **10 events in total**



Final Results of the OPERA Experiment on nu tau Appearance in the CNGS Neutrino Beam • N. Agafonova Phys.Rev.Lett. 120 (2018) 21, 211801, - 116 citations

Channel	Expected Background				Expected Signal	Total Expected
	Charm	Had. re-interaction	Large μ -scat.	Total		
$\tau \rightarrow 1h$	0.15 ± 0.03	1.28 ± 0.38	—	1.43 ± 0.39	2.96 ± 0.59	4.39 ± 1.39
$\tau \rightarrow 3h$	0.44 ± 0.09	0.09 ± 0.03	—	0.52 ± 0.09	1.83 ± 0.37	2.35 ± 0.58
$\tau \rightarrow \mu$	0.008 ± 0.002	—	0.016 ± 0.008	0.024 ± 0.008	1.15 ± 0.23	1.18 ± 0.25
$\tau \rightarrow e$	0.035 ± 0.007	—	—	0.035 ± 0.007	0.84 ± 0.17	0.87 ± 0.18
Total	0.63 ± 0.10	1.37 ± 0.38	0.016 ± 0.008	2.0 ± 0.4	6.8 ± 1.4	8.8 ± 1.8



$$\mathcal{L}(\mu, \beta_c) = \prod_{c=1}^4 \left(\text{Pois}(n_c | \mu s_c + \beta_c) \prod_{i=1}^{n_c} f_c(x_{ci}) \right) \cdot \prod_{c=1}^4 \text{Gauss}(b_c | \beta_c, \sigma_{b_c})$$

Labels for the equation:

- μs_c : signal strength
- β_c : true bkg (floating param.)
- n_c : channels
- $\mu s_c + \beta_c$: expected signal
- n_c : obs events in the c^{th} channel
- $f_c(x_{ci})$: BDT response
- β_c : expected bkg
- σ_{b_c} : uncertainty on exp bkg

$$f_c(x_{ci}) = \frac{\mu s_c}{\mu s_c + \beta_c} \text{PDF}_c^{\text{sig}} + \frac{\beta_c}{\mu s_c + \beta_c} \text{PDF}_c^{\text{bkg}}$$

Test statistic by profile-like Likelihood ratio

Results: background fluctuation probability p-value = $4 \cdot 10^{-10}$

Significance = 6.1 σ

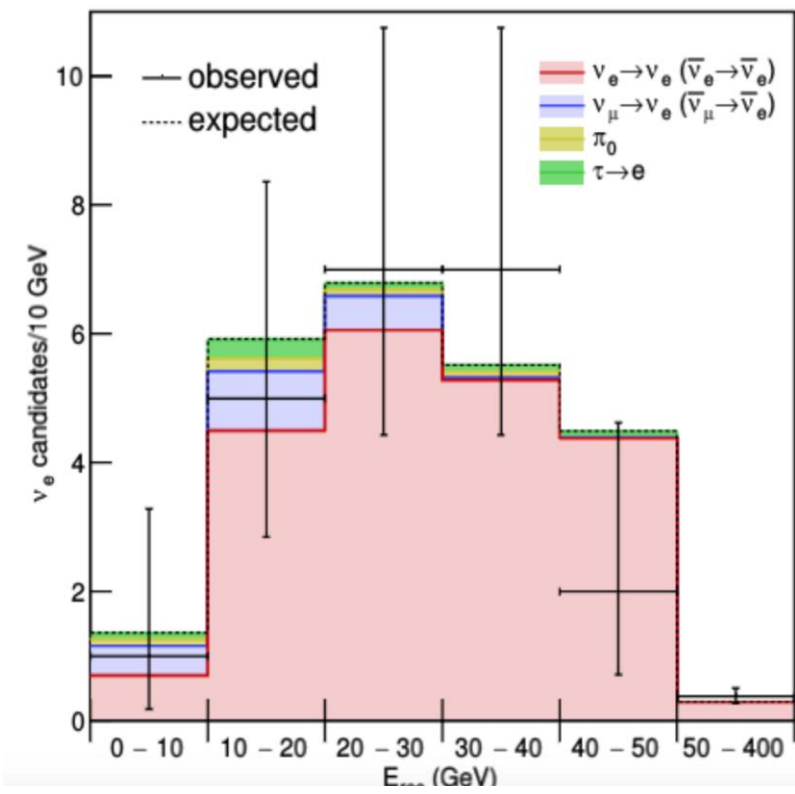


АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОННЫХ НЕЙТРИНО

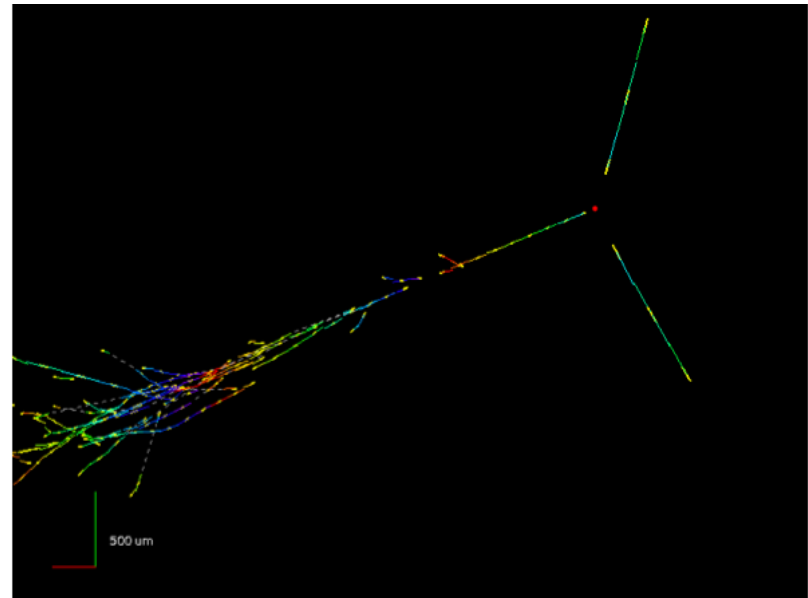
$\nu_e, \bar{\nu}_e$ from beam contamination	30.7 ± 3.1 (syst.)
π^0	0.5 ± 0.5 (stat.)
ν_τ from 3-flavour oscillations ($\tau \rightarrow e$ channel)	0.7 ± 0.2 (syst.)
Total expected bkg	31.9 ± 0.5 (stat.) ± 3.1 (syst.)
Expected spectrum in case of 3-flavour oscillations	34.3 ± 0.5 (stat.) ± 3.4 (syst.)
Data	35

Final results of the search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillations with the OPERA detector in the CNGS beam

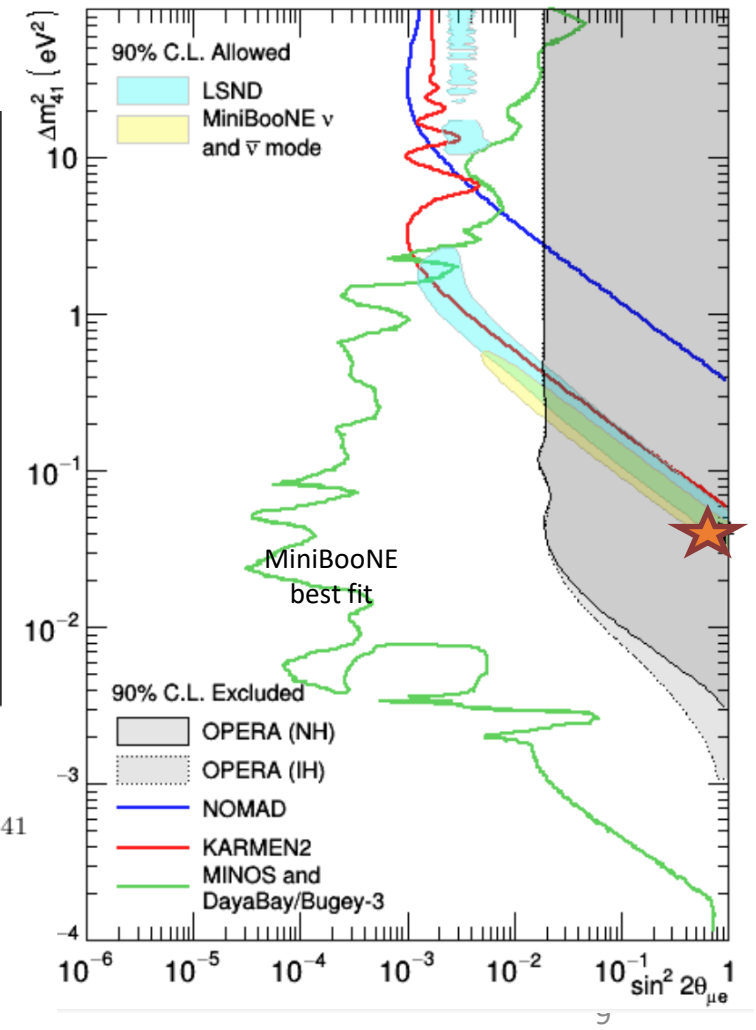
- N. Agafonova JHEP 06 (2018) 151] - 21 citations



Energy distribution to constrain the parameter space: shape analysis



$$\begin{aligned}
 P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} = & C^2 \sin^2 \Delta_{31} + \sin^2 2\theta_{\mu e} \sin^2 \Delta_{41} \\
 & + 0.5 C \sin 2\theta_{\mu e} \cos \phi_{\mu e} \sin 2\Delta_{31} \sin 2\Delta_{41} \\
 & - C \sin 2\theta_{\mu e} \sin \phi_{\mu e} \sin^2 \Delta_{31} \sin 2\Delta_{41} \\
 & + 2 C \sin 2\theta_{\mu e} \cos \phi_{\mu e} \sin^2 \Delta_{31} \sin^2 \Delta_{41} \\
 & + C \sin 2\theta_{\mu e} \sin \phi_{\mu e} \sin 2\Delta_{31} \sin^2 \Delta_{41}
 \end{aligned}$$



OPERA CERN Open Data проект

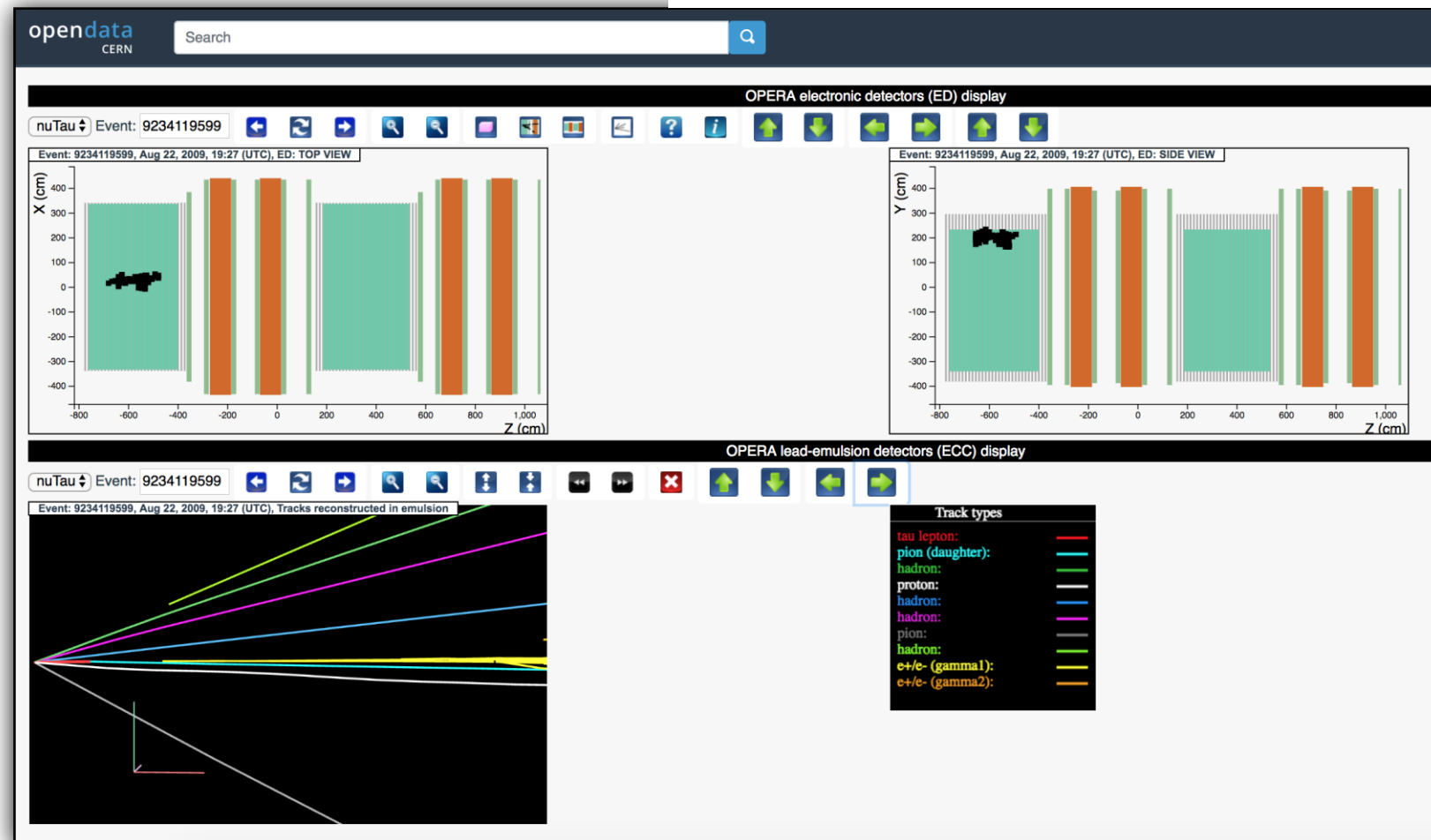
OPERA tau neutrino charged current interactions

OPERA Collaboration • N. Agafonova (Moscow, INR) et al. (Aug 12, 2021)

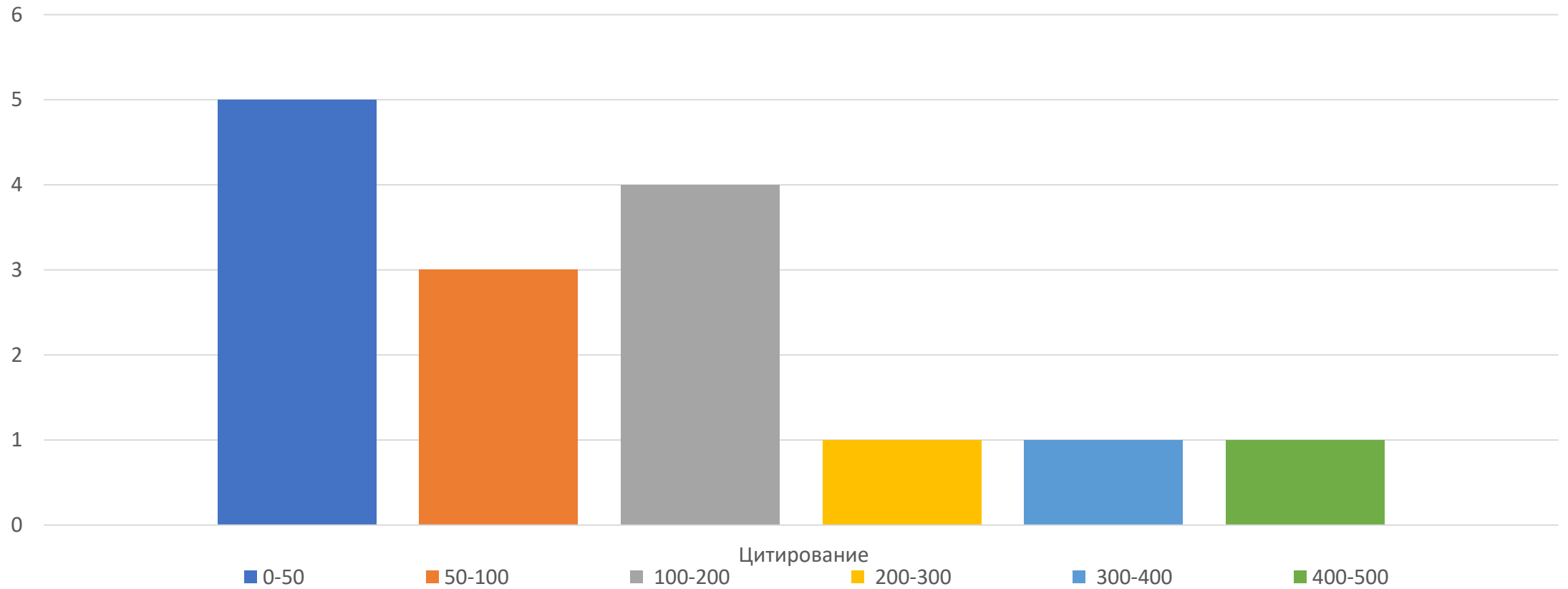
Published in: Sci.Data 8 (2021) 1, 218



В рамках проекта CERN Open Data данные по наиболее интересным событиям и инструменты для их анализа были выложены в открытый доступ, с тем чтобы все желающие (включая школьников, студентов) могли попробовать обработать информацию и самим получить результат.



Индекс цитирования статей в цикле



Члены группы ОИЯИ 12 раз представляли результаты эксперимента OPERA на международных конференциях.