

## 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.

В цикл включены работы, участие в подготовке которых группы ОИЯИ было существенным или определяющим. Ниже дается краткая аннотация этих работ.

Целью эксперимента OPERA было доказательство осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  путем прямой регистрации появления  $\tau$ -нейтрино в пучке мюонных нейтрино на удалении от источника нейтрино. Такие осцилляции объясняли бы наблюдаемый дефицит мюонных нейтрино в атмосферных ливнях. Эта задача была очень актуальной в конце 90-х годов, когда существование эффекта нейтринных осцилляций было официально признано, но их механизмы и параметры были изучены слабо.

Однако, регистрация тау-нейтрино – чрезвычайно сложная задача, впервые это удалось сделать только в 2001 году коллаборации DONuT в Фермилабе с помощью специального эмульсионного детектора ( “Emulsion Cloud Chamber” – ECC). Поиск тау нейтрино в эксперименте OPERA был еще сложнее, так как регистрировать нейтрино нужно было на расстоянии 730 км от места рождения на SPS в ЦЕРН, где их поток существенно ослаблен. В начале 2000-х годов коллаборация OPERA была оформлена и началось создание гибридного детектора, имеющего мишенную часть (ECC) и электронные детекторы. Параллельно в ЦЕРН создавался новый нейтринный пучок - CNGS. В 2006 году он был запущен и первые мюонные нейтрино были зарегистрированы в детекторе OPERA в подземной лаборатории Гран Сассо в Италии. Детектор имел беспрецедентные характеристики: при массе около 1200 тонн достигалось исключительно высокое пространственное и угловое разрешение (менее 1 микрометра и менее 0.5 мрад, соответственно), благодаря чему стало возможным эффективное распознавание взаимодействий тау-нейтрино по каналу заряженного тока, т.е. прямая регистрация рождения тау лептона и его распад.

Основные данные были набраны с 2008 по 2012 год, всего было зарегистрировано около 20000 нейтринных событий, из которых с помощью мультивариативного анализа, основанного на нейронной сети, было отобрано 10 событий, что при фоне 2 события означало достоверность регистрации тау-нейтрино на уровне, превышающем 6 «сигма». Таким образом, осцилляции мюонных нейтрино в тау нейтрино путем наблюдения появления последних в первоначально чистом пучке  $\nu_\mu$  были открыты, и главная цель эксперимента успешно достигнута. Этот результат, полученный благодаря усилиям всех членов Коллаборации OPERA, стал важным дополнением результатов исследования нейтринных осцилляций в режиме «исчезновения», полученных в других экспериментах. Также была сделана оценка сечения взаимодействия тау-нейтрино и параметров осцилляций в «атмосферном» секторе в режиме «появления».

Детектор OPERA мог эффективно регистрировать также и электронные нейтрино. Однако, осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  в режиме появления в кинематической области, на которую был настроен эксперимент, не было обнаружено, количество найденных случаев взаимодействия электронных нейтрино соответствовало уровню их примеси в пучке. Тем не менее анализ данных с электронными нейтрино, в которых группа ОИЯИ принимала непосредственное участие, позволил установить ограничения на существование стерильных нейтрино в режиме появления.

Группа ОИЯИ активно участвовала в создании Target Tracker'a (ТТ): изготовление скинтилляционных 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 62000м<sup>2</sup>.

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.

В 2011 году группа участников эксперимента из Лиона выполнила оценку времени пролета нейтрино в пучке CNGS. Из-за ряда технических погрешностей результат имел большую систематическую ошибку, приводящую к парадоксальному результату относительно скорости нейтрино. Усилиями других участвующих в OPERA групп удалось довольно быстро обнаружить источник ошибки, связанный с электроникой. В то же время группа ОИЯИ предложила более точный способ регистрации времени взаимодействия нейтрино в ТТ, дополнительно устранявший систематическую ошибку около 7 нс, в результате, полученном французской группой. Этот метод был использован при получении окончательных результатов измерения скорости нейтрино, опубликованных в 2012 году

Исключительное пространственное разрешение эмульсионных детекторов делает анализ событий в них очень наглядным и понятным. 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. Этому проекту, осуществленному в значительной мере благодаря группе ОИЯИ, посвящена последняя опубликованная в 2021 году статья Коллаборации OPERA.

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

Члены группы участвовали в руководстве эксперимента: Горнушкин Ю.А. и Дмитриевский С.Г. входили в Исполнительный комитет OPERA, Горнушкин Ю.А. с 2012 года является заместителем руководителя Коллаборации OPERA.

### **Публикации, представленные на конкурс:**

1. 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 – 0 citations

2. Final results on neutrino oscillation parameters from the OPERA experiment in the CNGS beam

OPERA Collaboration • N. Agafonova (Moscow, INR) et al. (Apr 11, 2019)

Published in: Phys.Rev.D 100 (2019) 5, 051301 • e-Print: 1904.05686 [hep-ex] - 9 citations

3. Final Results of the OPERA Experiment on nu tau Appearance in the CNGS Neutrino Beam

OPERA Collaboration • N. Agafonova (Moscow, INR) et al. (Apr 13, 2018)

Published in: Phys.Rev.Lett. 120 (2018) 21, 211801, Phys.Rev.Lett. 121 (2018) 13, 139901 (erratum) • e-Print: 1804.04912 [hep-ex] - 116 citations

4. Final results of the search for  $\nu \mu \rightarrow \nu e$  oscillations with the OPERA detector in the CNGS beam  
OPERA Collaboration • N. Agafonova (Moscow, INR) et al. (Mar 30, 2018)  
Published in: JHEP 06 (2018) 151 • e-Print: 1803.11400 [hep-ex] - 21 citations
5. Discovery of  $\tau$  Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment  
OPERA Collaboration • N. Agafonova (Moscow, INR) et al. (Jul 6, 2015)  
Published in: Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 12, 121802 • e-Print: 1507.01417 [hep-ex]  
- 199 citations
6. Limits on muon-neutrino to tau-neutrino oscillations induced by a sterile neutrino state obtained by OPERA at the CNGS beam  
OPERA Collaboration • N. Agafonova (Moscow, INR) et al. (Mar 6, 2015)  
Published in: JHEP 06 (2015) 069 • e-Print: 1503.01876 [hep-ex]- 37 citations
7. Locating the neutrino interaction vertex with the help of electronic detectors in the OPERA experiment  
Yu.A. Gornushkin (Dubna, JINR), S.G. Dmitrievsky (Dubna, JINR), A.V. Chukanov (Dubna, JINR) (Jan 7, 2015) Published in: Phys.Part.Nucl.Lett. 12 (2015) 1, 89-99 - 5 citations
8. Evidence for appearance  $\nu \mu \rightarrow \nu \tau$  in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment  
OPERA Collaboration • N. Agafonova (Moscow, INR) et al. (Jan 9, 2014)  
Published in: Phys.Rev.D 89 (2014) 5, 051102 • e-Print: 1401.2079 [hep-ex]- 130 citations
9. Search for oscillations  $\nu \mu \rightarrow \nu e$  with the OPERA experiment in the CNGS beam  
OPERA Collaboration • N. Agafonova (Moscow, INR) et al. (Mar 16, 2013)  
Published in: JHEP 07 (2013) 004, JHEP 07 (2013) 085 (addendum) • e-Print: 1303.3953 [hep-ex] - 168 citations
10. Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam  
OPERA Collaboration • T. Adam (Louis Pasteur U., Strasbourg I) et al. (Sep, 2011)  
Published in: JHEP 10 (2012) 093 • e-Print: 1109.4897 [hep-ex] - 429 citations
11. Study of neutrino interactions with the electronic detectors of the OPERA experiment  
OPERA Collaboration • N. Agafonova (Moscow, INR) et al. (Feb, 2011)  
Published in: New J.Phys. 13 (2011) 053051 • e-Print: 1102.1882 [hep-ex]  
- 74 citations
12. Observation of a first candidate  $\nu \tau$  in the OPERA experiment in the CNGS beam  
OPERA Collaboration • N. Agafonova (Moscow, INR) et al. (Jun, 2010)  
Published in: Phys.Lett.B 691 (2010) 138-145 • e-Print: 1006.1623 [hep-ex] - 358 citations
13. Measurement of the atmospheric muon charge ratio with the OPERA detector  
OPERA Collaboration • N. Agafonova (Moscow, INR) et al. (2010)  
Published in: Eur.Phys.J.C 67 (2010) 25-37 • e-Print: 1003.1907 [hep-ex]  
- 67 citations

14. The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam

R. Acquafredda (INFN, Naples), T. Adam (Strasbourg, IPHC), N. Agafonova (Moscow, INR),  
P. Alvarez-Sanchez (CERN), M. Ambrosio (INFN, Naples) et al. (Apr, 2009)

Published in: JINST 4 (2009) P04018 - 289 citations

15. The OPERA experiment target tracker

T. Adam (Strasbourg, IPHC), et al. (Jan, 2007)

Published in: Nucl.Instrum.Meth.A 577 (2007) 523-539 • e-Print: physics/0701153 [physics]

- 93 citations