

Эксперимент “OPERA”. Современный статус и перспективы

*Роганова Т.М.
НИИЯФ МГУ*



План:

1. Нейтринная физика: основные результаты.
2. Гипотеза осциляций, эксперименты.
3. Эксперимент OPERA.
4. Эмульсии – основной элемент детектора.
5. Эффективность, оценка фона.
6. Автоматизация обработки эмульсий – сканирование.
7. Планы эксперимента.
8. Полномасштабный эксперимент
9. Итоги и планы на будущее.

Нейтринная физика: основные результаты.

Краткая история нейтринных исследований

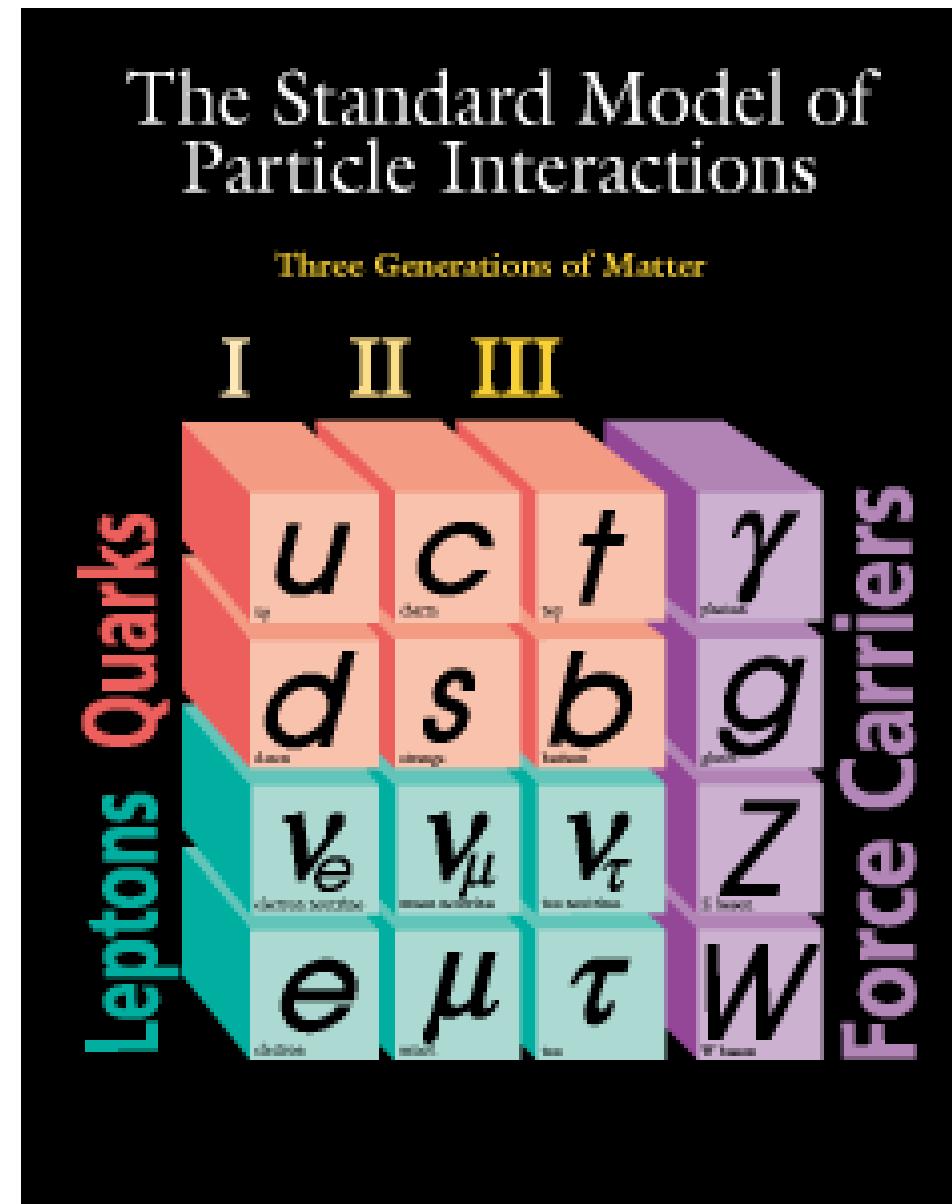
1896 Беккерель – радиоактивность

1914 Чадвик – непрерывный спектр β-электронов

- 1930 Паули предположил существование нейтрино
- 1946 Понтекорво высказал идею о возможности детектирования нейтрино от реакторов с помощью радиохимического метода
- 1953 Прямое доказательство существования нейтрино – регистрация $\bar{\nu}_e$ от реактора (Коуэн, Райнес): $\nu_e + p \rightarrow n + e^+$
- 1956 Ландау, Ли и Янг предложили гипотезу двухкомпонентного нейтрино
- 1957 Понтекорво, гипотеза нейтринных осцилляций
- 1959 Понтекорво, Ли и Янг предложили идею ускорительного эксперимента на сравнение числа μ и e , образованных при взаимодействии с веществом детектора ν_μ от ускорителя
- 1962 Ледерман, Шварц и Штейнбергер на ускорителе AGS в Брукхевене показали, что $\nu_e \neq \nu_\mu$ и $\nu_e \neq \nu_\mu$
- 1973 Открытие нейтральных токов (CERN, Гаргамель):
 $\nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) + N \rightarrow \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) + \text{адроны}; \nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$
- 1975 Подтверждение дублетной структуры кваркового слабого тока - наблюдение в ν-реакциях на ускорителе FNAL событий с двумя мюонами разного знака заряда
- 1994 На ускорителе LEP показано, что существуют только три поколения легких нейтрино
- 1998... Открытие нейтринных осцилляций: SK (атм.), K2K (ускоритель)

Нейтринные эксперименты сыграли фундаментальную роль в становлении СМ

Нейтрино в Стандартной Модели



Гипотеза осциляций, эксперименты.

Масса? Сохранение лептонных чисел?

Природа массивных нейтрино?,...

- Традиционно: $m = 0$, сохранение L
- Если $m \neq 0$, L – не сохраняется \rightarrow
- Смешивание \rightarrow

$$\text{weak states} \begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix} \text{mass states}$$

PMNS matrix - analogous to the quark CKM matrix

- Нейтринные осцилляции
- Б. М. Понтекорво, 1957

Современный статус нейтринных осцилляций

Солнечные нейтрино

в веществе Солнца с MSW

$$\Delta m^2 = (10^{-5} - 10^{-6}) \text{ эВ}^2$$

$$\sin^2 2\theta \approx 10^{-3} \text{ или } \sin^2 2\theta \approx 0.8 - 1$$

Атмосферные нейтрино

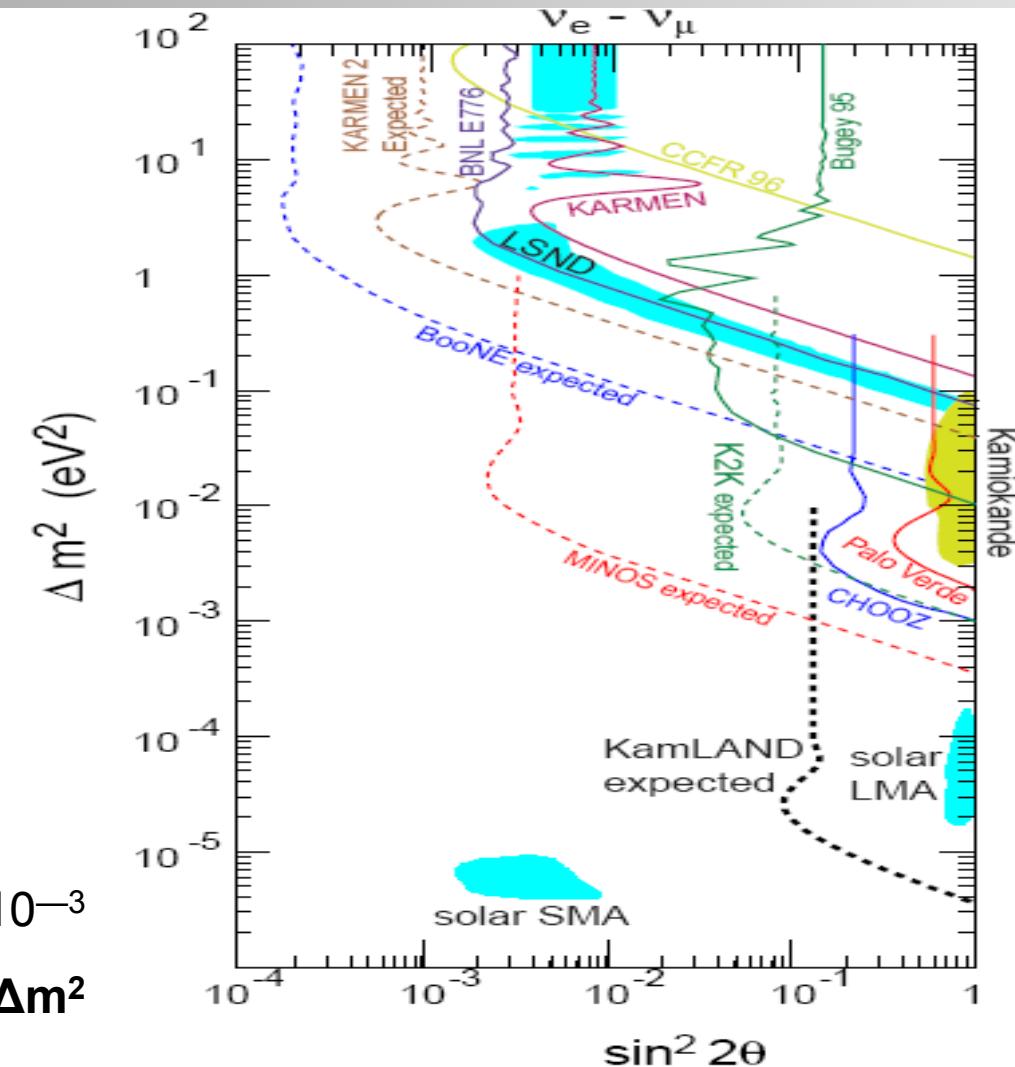
$$\Delta m^2 = (10^{-2} - 10^{-3}) \text{ эВ}^2$$

$$\sin^2 2\theta \approx 0.8 - 1$$

Эксперимент LSND

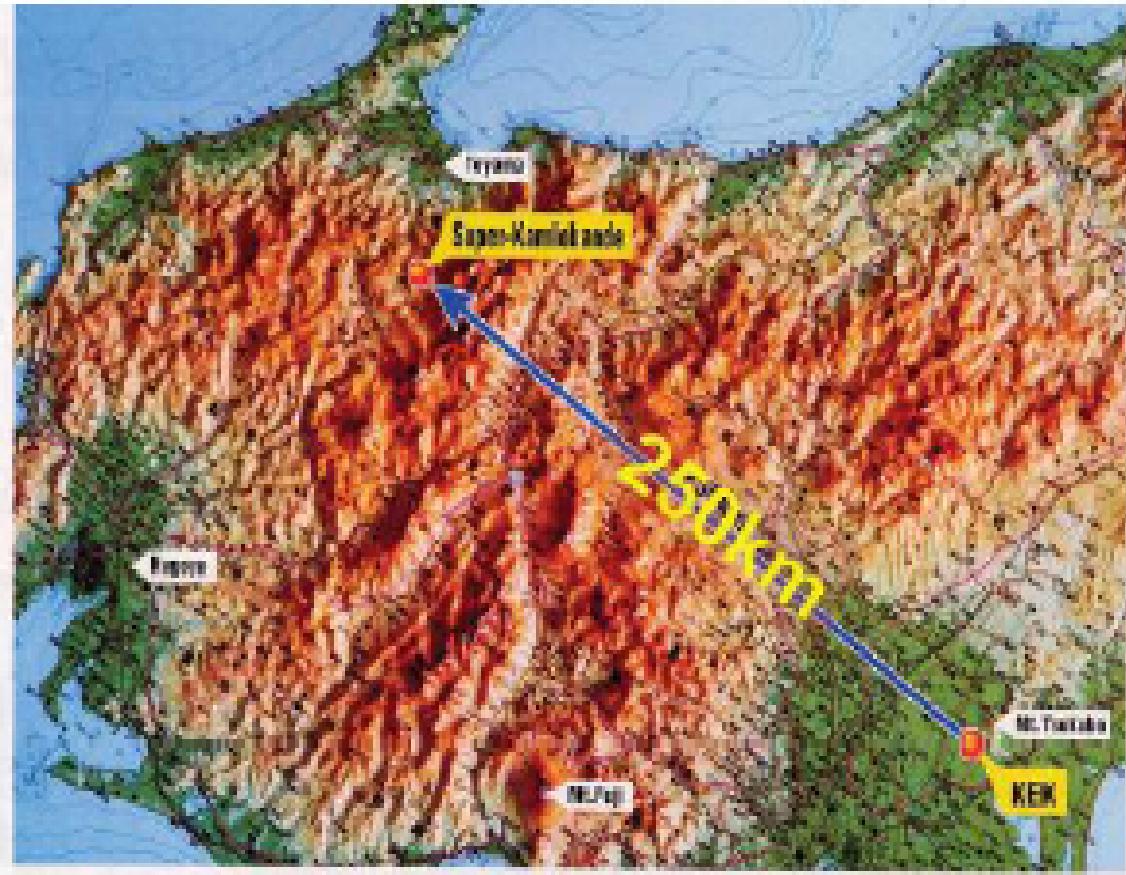
$$0.3 \leq \Delta m^2 \leq 2.2 \text{ эВ}^2 \quad \sin^2 2\theta \approx 10^{-2} - 10^{-3}$$

Три неперекрывающиеся области по Δm^2



K2K – the 1st Long-Baseline Accelerator-based Experiment

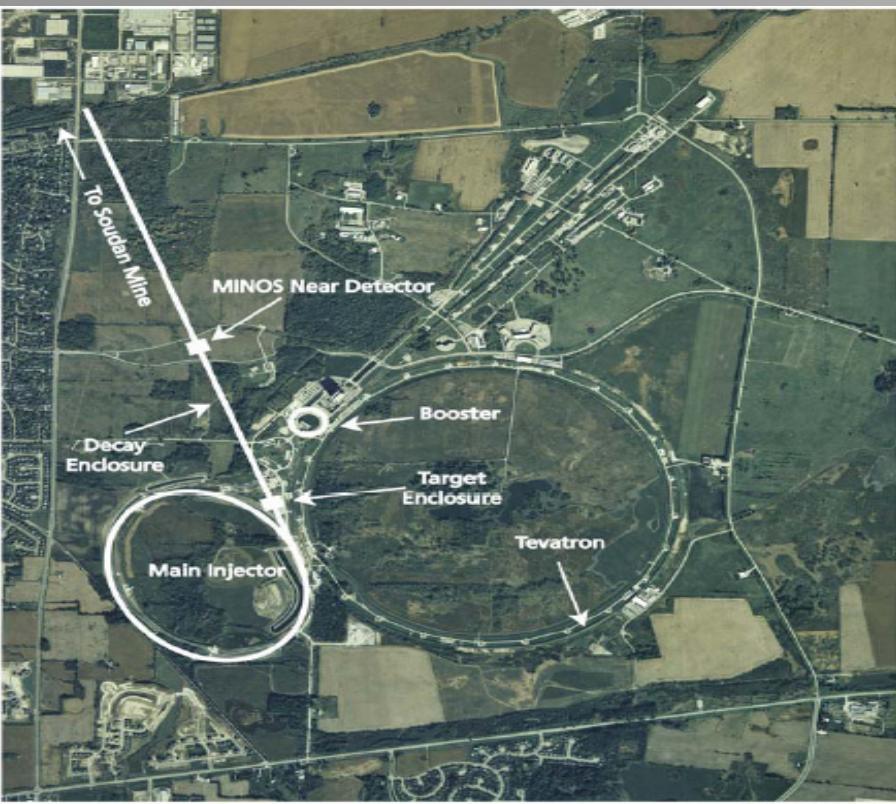
Super-Kamiokande I



Подтвердил результаты с атмосферными
нейтрино S-K: ожидалось **80**
зарегистрировано **56** мюонных событий

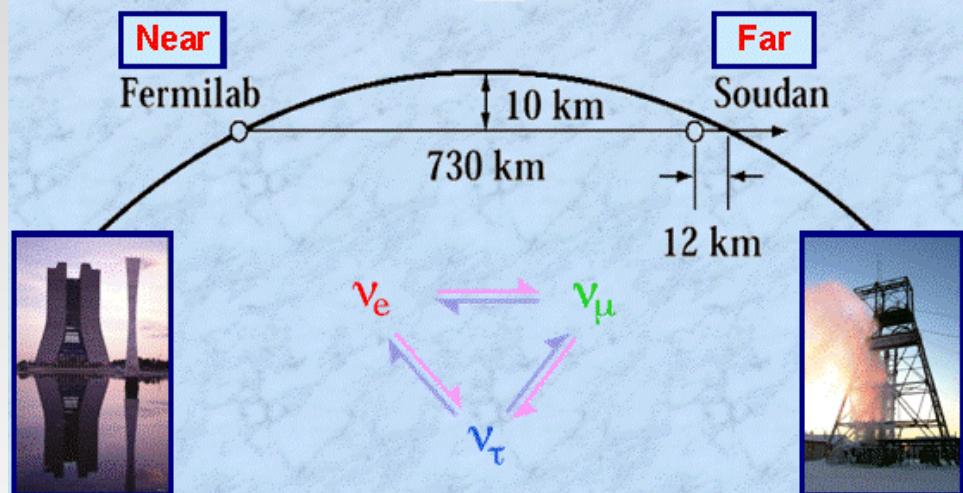
12GeV PS@KEK
 ν beamline

MINOS



Подтверждение S-K

Ожидалось **177 ± 11** **5σ**
зарегистрировано **92**
 $\Delta m^2 = (3.05 \pm 0.60 \text{ (стат.)} \pm 0.12 \text{ (систем.)}) \cdot 10^{-3}$ эВ^2
 $\sin^2 2\theta = 0.88 \pm 0.15 \text{ (стат.)} \pm 0.06 \text{ (систем.)}$



Физика массивных смешанных нейтрино

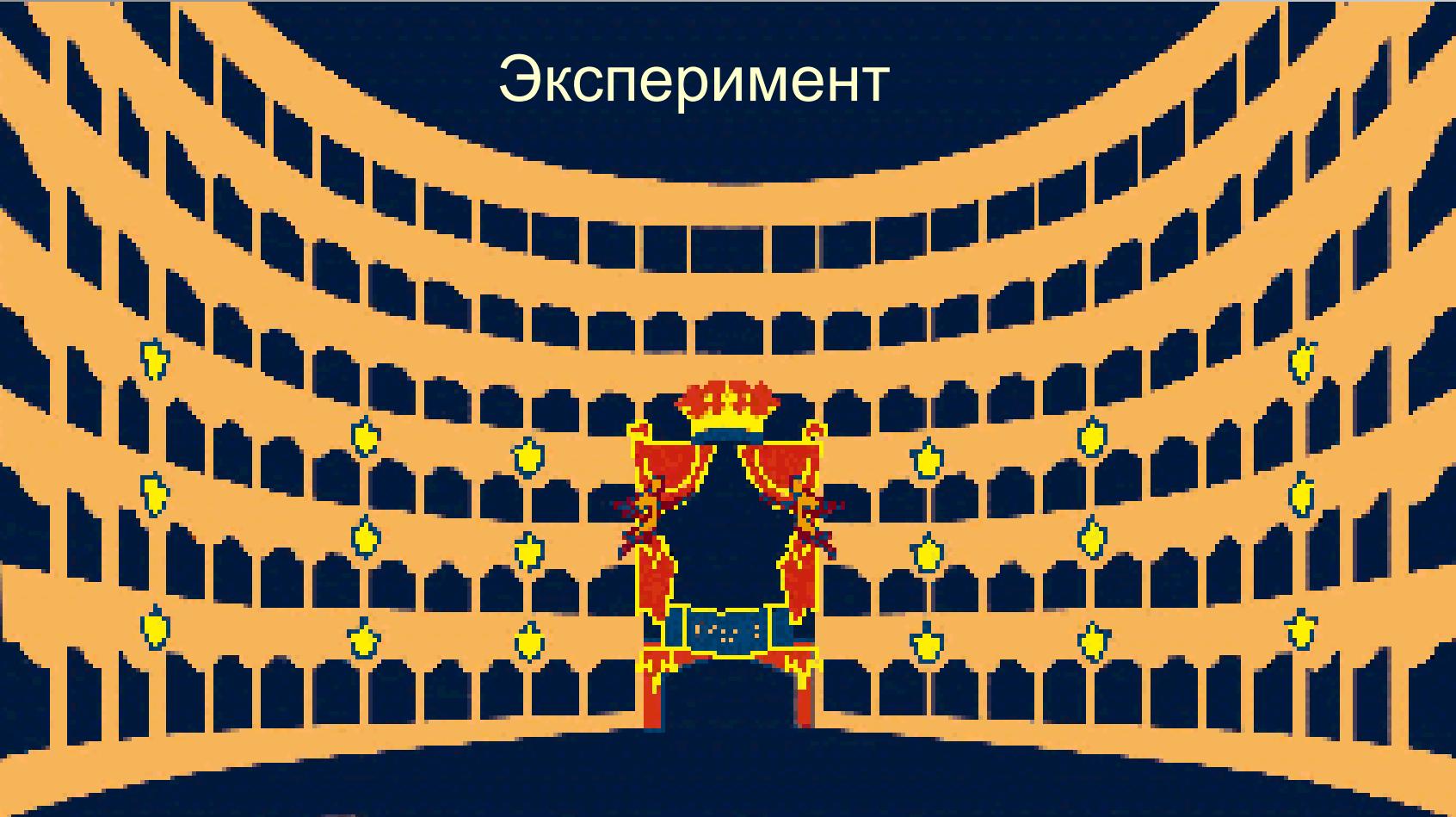
- Число легких нейтрино?
- Природа нейтрино с определенными массами?
- Абсолютные величины масс?
- Параметры матрицы смешивания?
- СР-нарушение?

Нужны новые данные!

Эксперименты по нейтриным осциляциям

- Реакторные: CHOOZ, Palo-Verde, KamLand, BOREXINO
- Мезонные фабрики: LSND, KARMEN
- Ускорители : CHORUS, NOMAD, DONUT
- Солнечные нейтрино: Homestake, GALEX, Kamiokande, Super-Kamiokande, GNO, SNO
- Атмосферные нейтрино: NUSEX, Soudan-2, IMB, Kamiokande, Super-Kamiokande, BOREXINO, UNO, MACRO
- Ускорители (ДН): K2K, MINOS, OPERA
- ПЕРСПЕКТИВЫ: мюонные накопительные кольца, нейтринные фабрики
- HARP (Hadron Production at the CERN PS proton synchrotron)

Эксперимент



OPERA



OPERA

Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus –
эксперимент по прямому наблюдению осцилляций нейтрино

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau.$$

Целью эксперимента OPERA является наблюдение
осцилляций ν_μ в ν , в пучке ν_μ от ускорителя ЦЕРН
посредством прямой регистрации t -лептонов в ядерной
эмulsionии в подземной лаборатории Гран-Сассо.

13 стран, 36 институтов (броссийских)



OPERA

Annecy, Lyon,
Strasbourg



Bern
Neuchatel
Zurich



Brussels



Hamburg, Münster,
Rostock



Zagreb

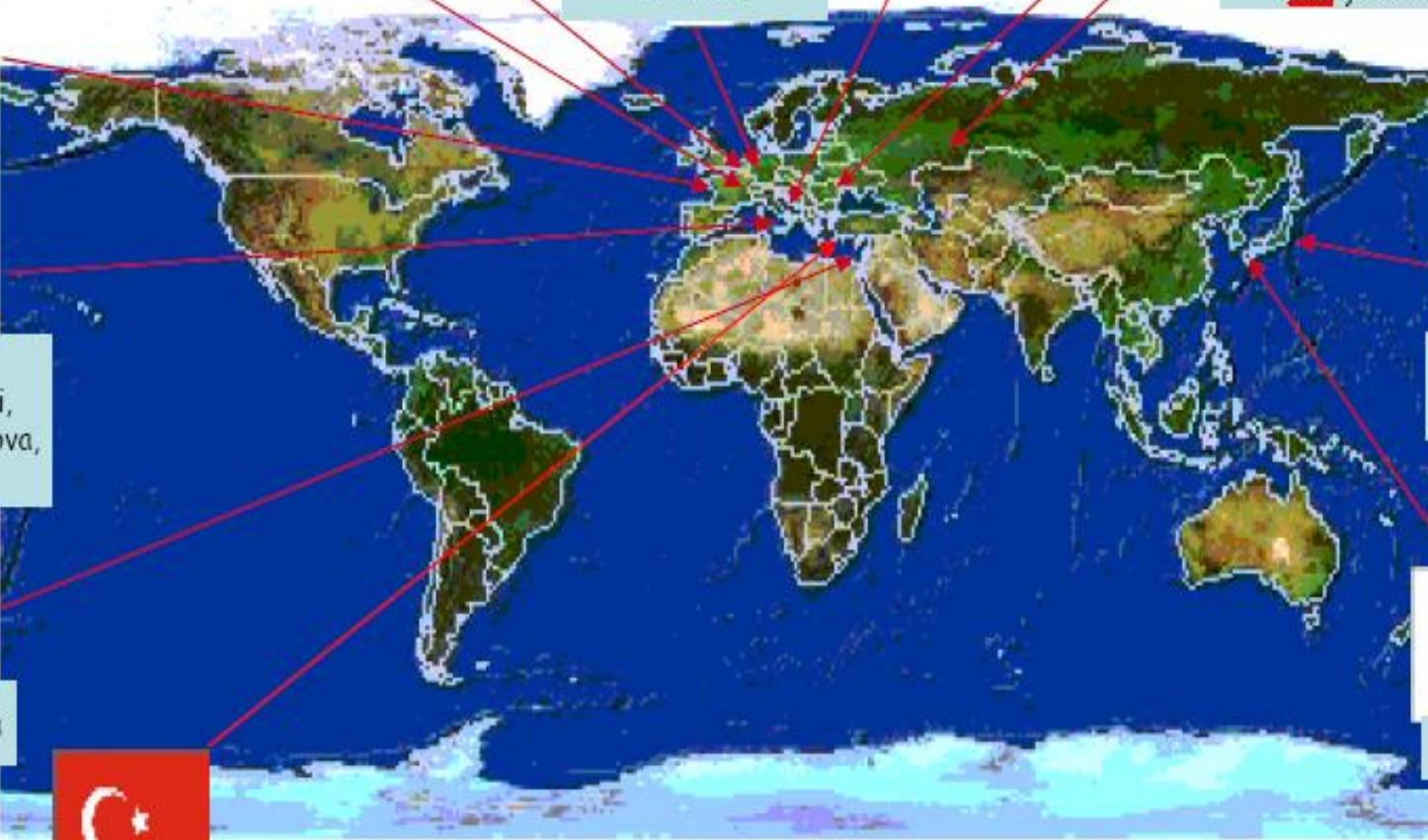


Sofia



Dubna, Moscow
(INR,LPI,ITEP,SINP
MSU) Obninsk

!!!



METU Ankara

36 INSTITUTIONS, ~200 PHYSICISTS

**В августе 2006 г. в
нейтринном
детекторе
подземной
лаборатории Gran
Sasso впервые
зарегистрированы
более 300
нейтрино,
созданных
ускорителем SPS
CERN (732 км).**

INTERNATIONAL JOURNAL OF HIGH-ENERGY PHYSICS

CERN COURIER

VOLUME 46 NUMBER 9 NOVEMBER 2006



OPERA makes its grand debut

ACCELERATORS
Laser-wakefield device reaches 1 GeV p5

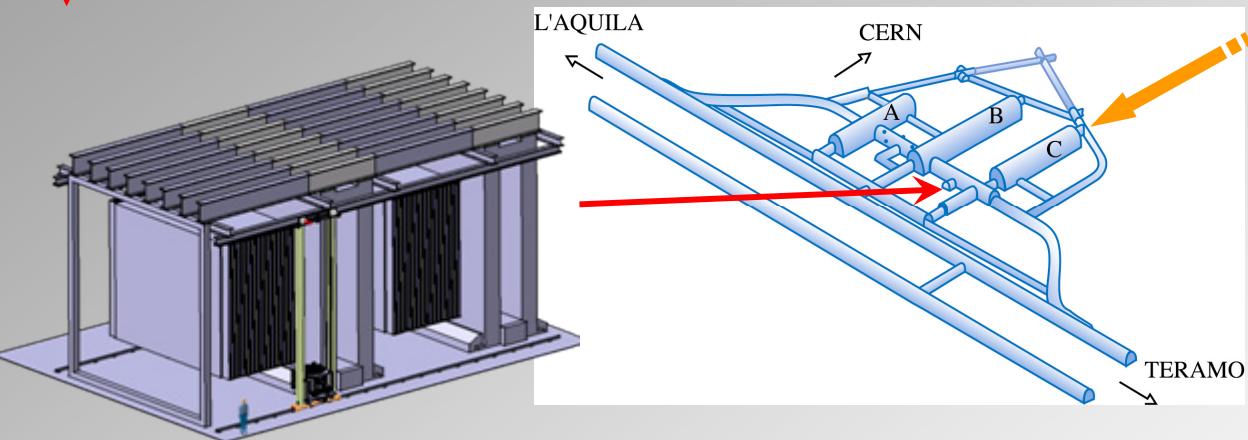
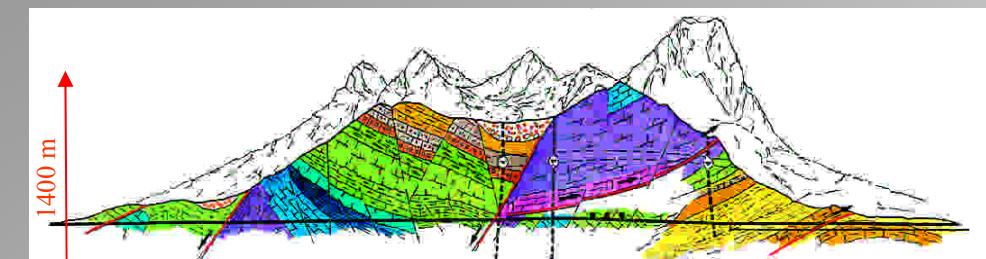
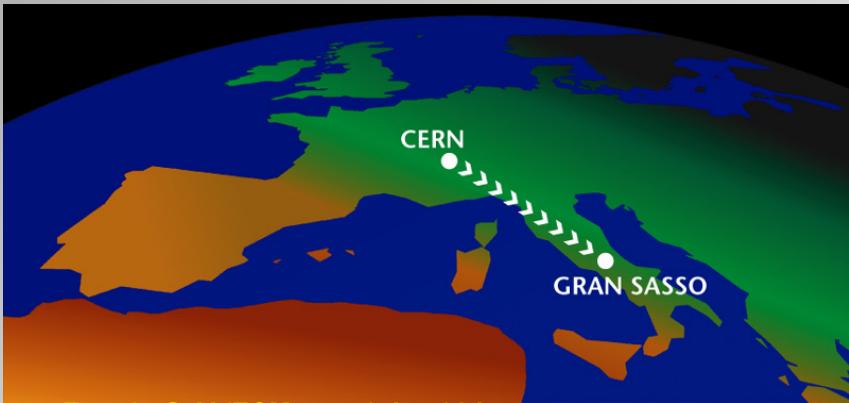
COMPUTING NEWS
Business signs up to work with EGEE p12

INTERVIEW
Stephen Hawking pays a visit to CERN p28



Прямой поиск осцилляций
 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ с помощью
наблюдения появления ν_τ
в чистом пучке ν_μ ;
Поиск осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ и
измерение θ_{13}

эксперимент OPERA



$4.5 \times 10^{19} \text{ pot/year}$

$\nu_\mu \text{ CC } / \text{kton}$	2900
$\nu_\mu \text{ NC } / \text{kton}$	875
$\langle E \rangle_\nu (\text{GeV})$	17
$(\nu_e + \nu_e) / \nu_\mu$	0.85 %
ν_μ / ν_μ	2.1 %
$\nu_\tau \text{ prompt}$	negligible

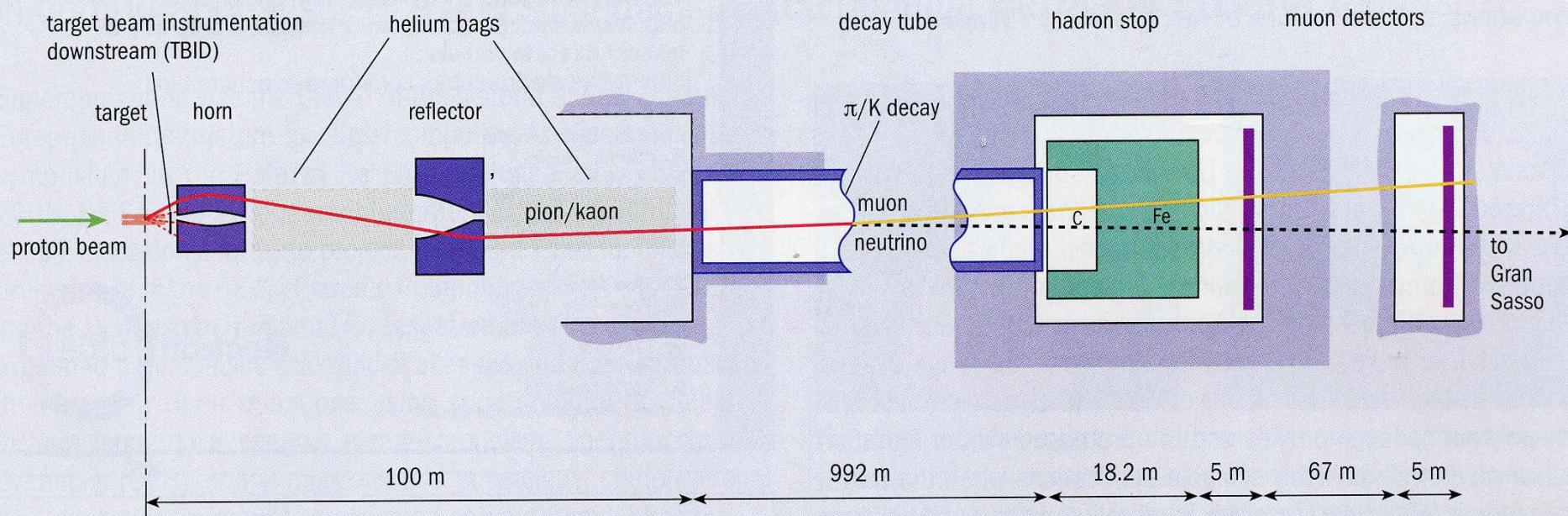
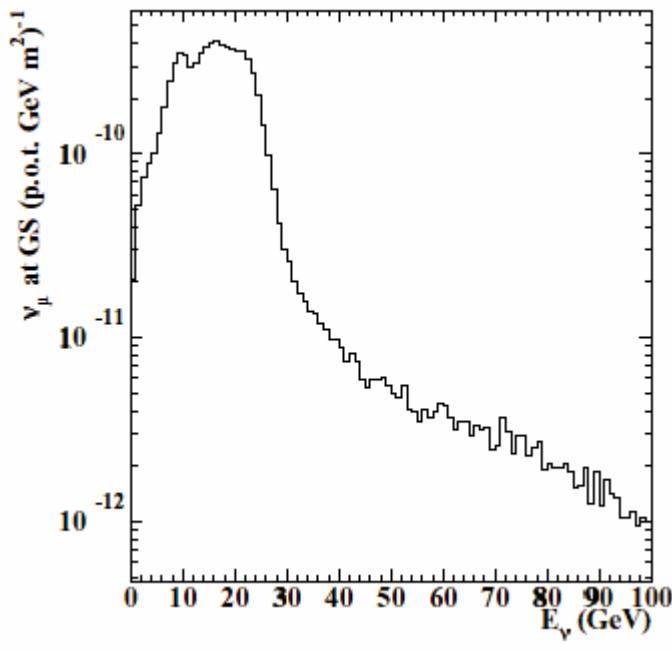
Детектор должен быть мишенью для ν и детектором для распадов τ
одновременно - ECC



«Сброс» 4×10^{19} протонов на мишень в год

Пучок в основном состоит из ν_μ

Примесь $\bar{\nu}_\mu$ - 2%, ν_e - 1%



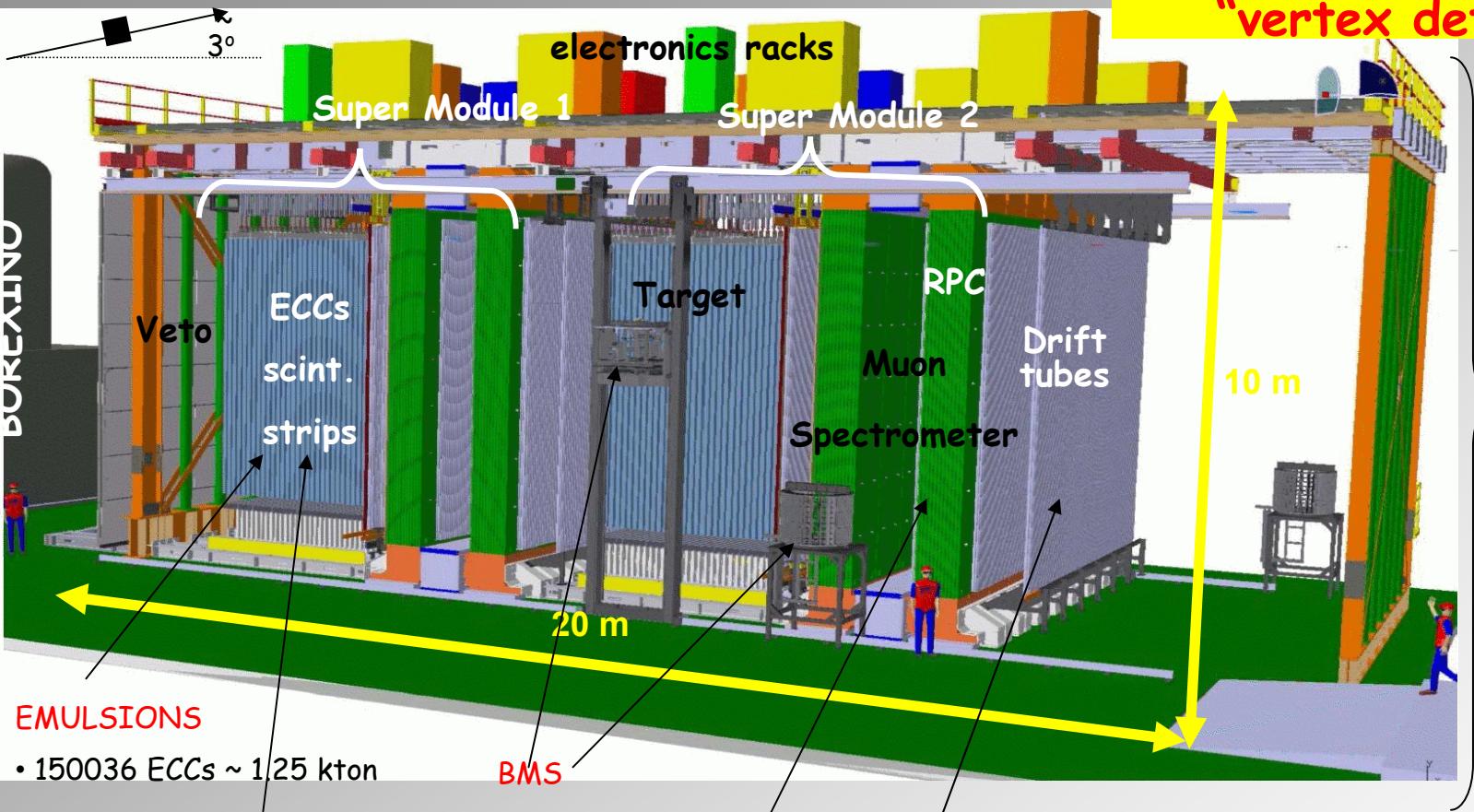
The various components of the CERN Neutrinos to Gran Sasso facility, which produces an intense beam of muon-neutrinos.

детектор OPERA,
150000 эмульсионных кирпичей



The OPERA detector

a quite large fine grained
"vertex detector"!



TARGET TRACKERS

- 2 x 31 scintillator strips walls
- 256+256 X-Y strips/wall
- both-sides readout, WLS fiber
- 64-channel H7546 PMT
- 63488 channels
- ~ 0.8 cm (2.6 cm pitch)
- $\epsilon \cong 99\%$
- rate $\cong 20$ Hz/pixel @1 p.e.

Brick Manipulator system

INNER TRACKERS

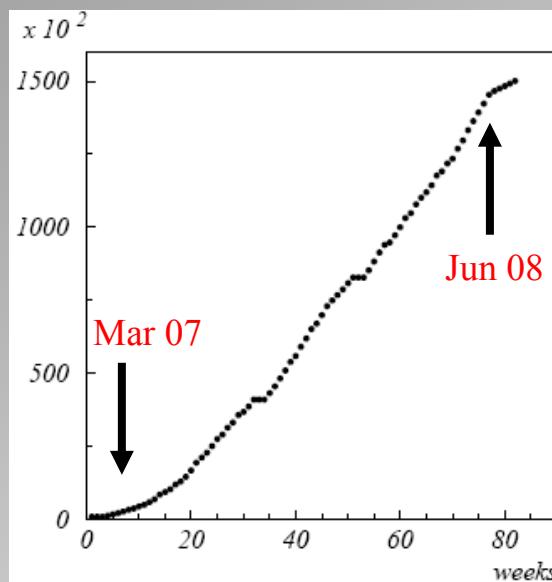
- 990-ton Fe dipole magnets ($B=1.55$ T) instrumented with
- 22 RPC planes (streamer mode)
- 3050 m^2 surface
- ~ 1.3 cm spatial resolution
- $\epsilon \cong 96\%$ (geometrical)

HIGH PRECISION TRACKERS

- 6 drift-tube layers/spectrometer
- spatial resolution < 0.5 mm

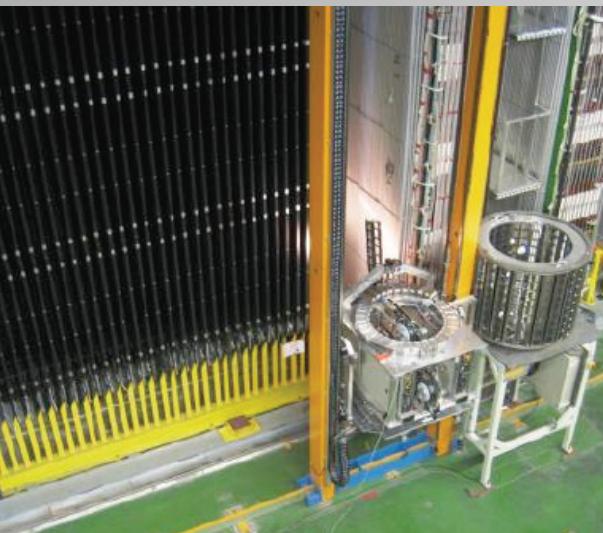
+ several essential "off-site" ancillary facilities:

- emulsion "refreshing",
- brick assembly/disassembly
- labelling
- automatic development
- scanning



150036 brick
have been
produced and
installed in the
detector (1.25
kton mass)

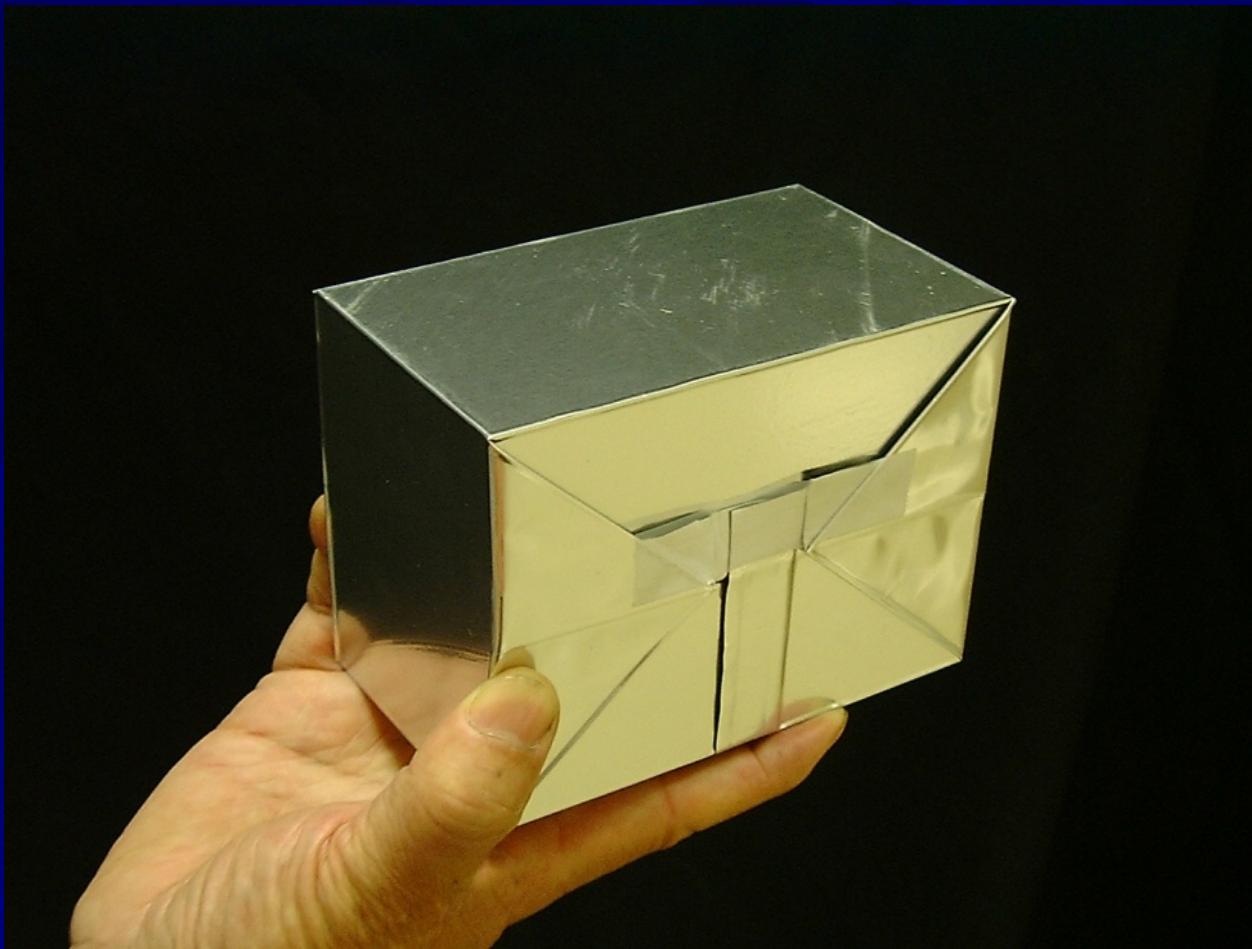
OPERA is an **hybrid detector** built running in parallel with several ancillary facilities that - before 2008 – hadn't been validated at nominal speed





75% от запланированного
29 стенок
51 ряд
150036 кирпичей

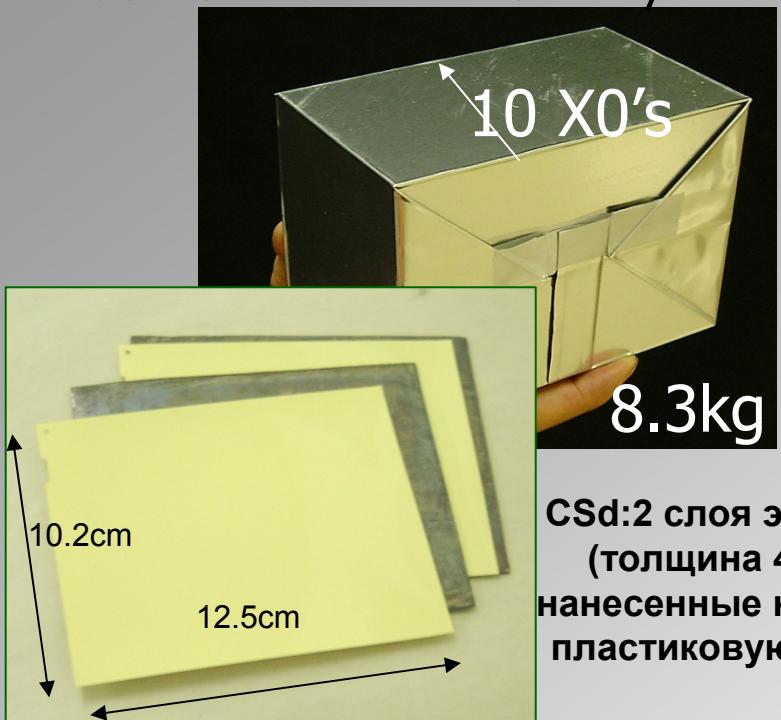
**Эмульсии – основной элемент
детектора.**



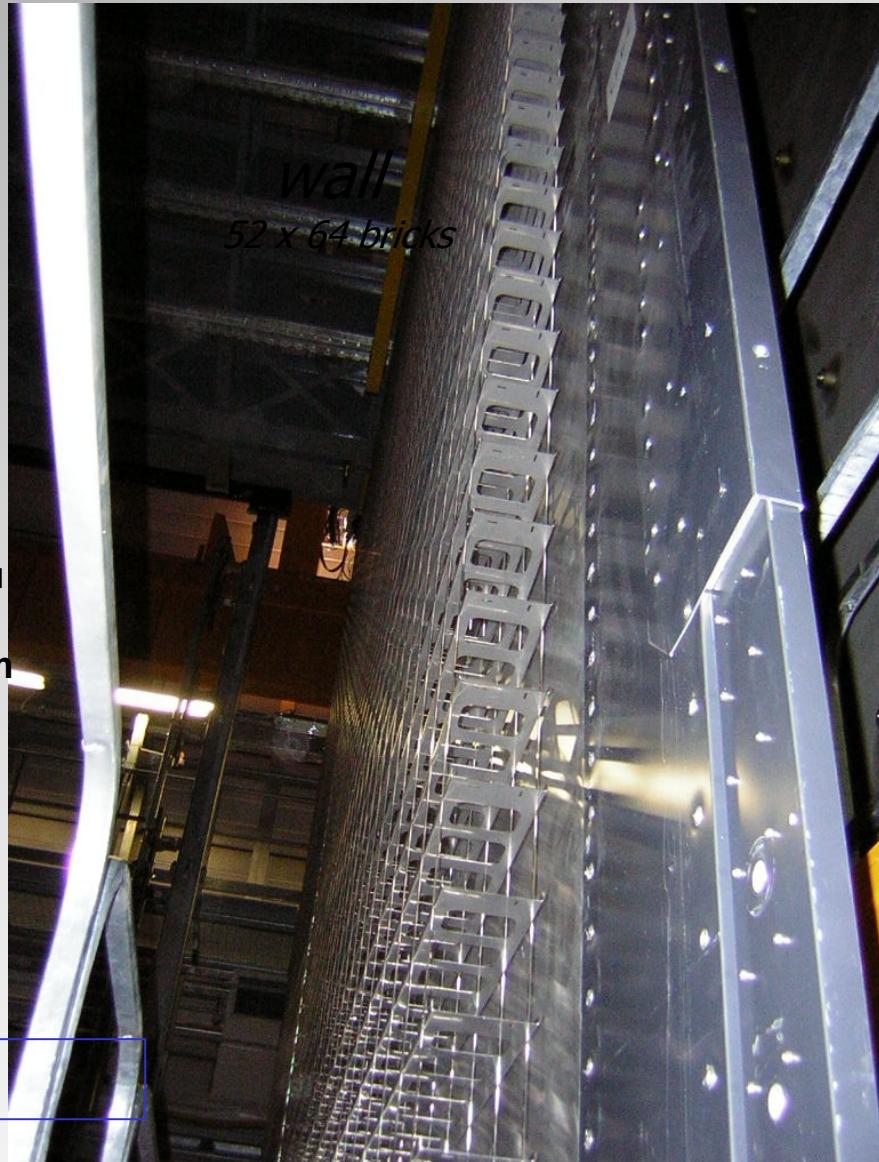


Мишень из свинца и эмульсии (масса 1,25 кТ)

эмульсионный кирпич
56 Pb пластин + 57 эмульсий



CSd: 2 слоя эмульсии
(толщина 44 μm),
нанесенные на 205 μm
пластиковую основу



- Высокое пространственное разрешение (эмulsionия) + массивная мишень (свинец)

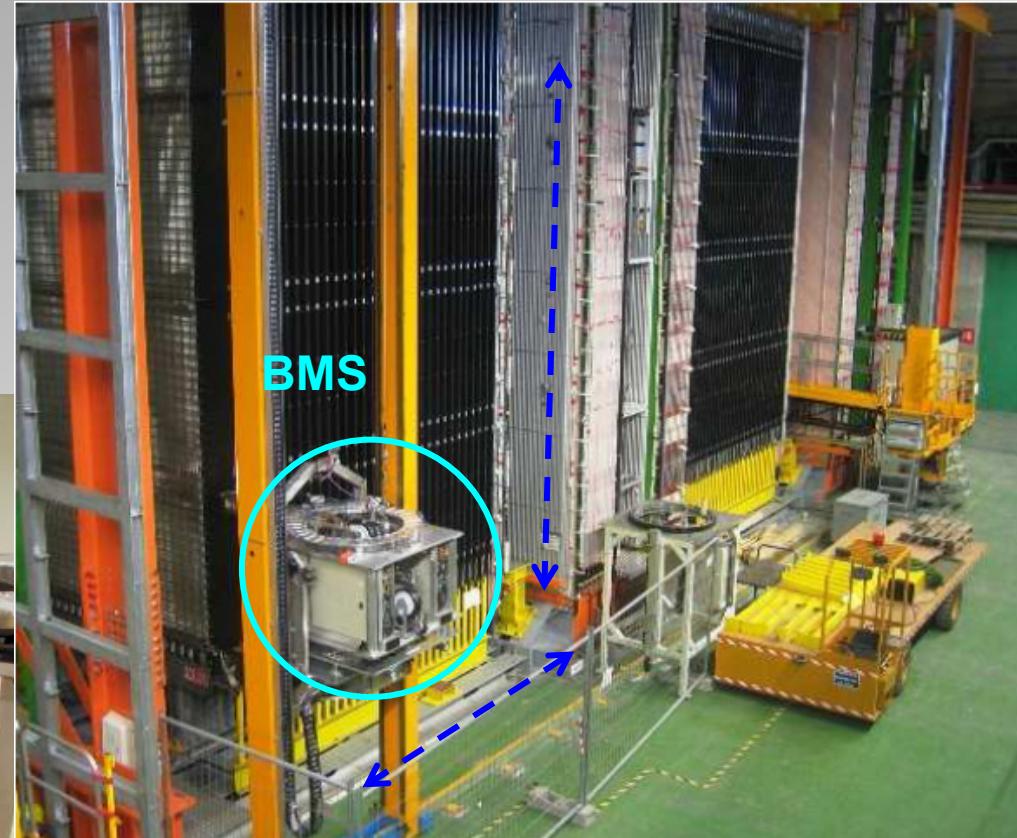
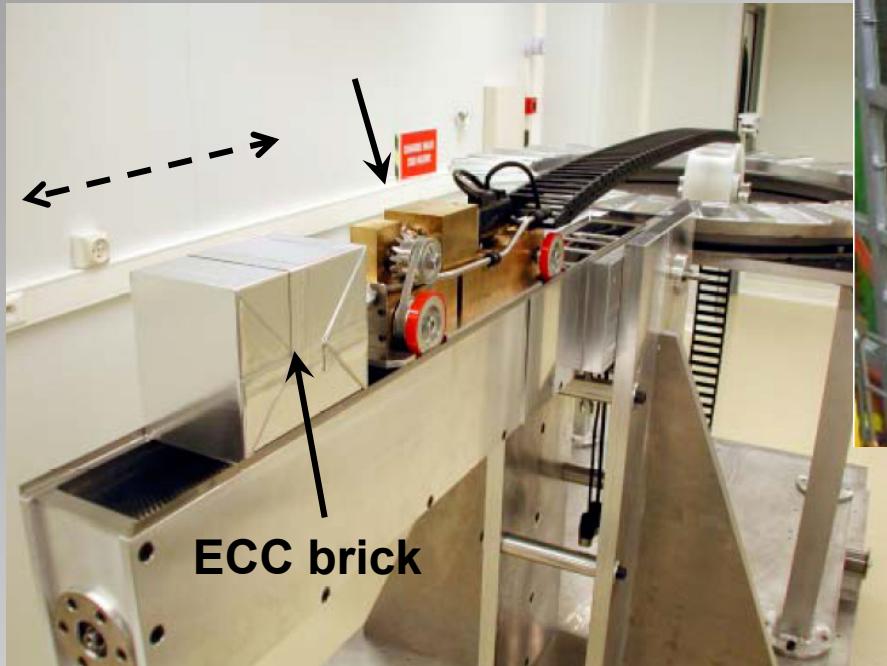
Track reconstruction accuracy inside emulsion layers:

$$\Delta x \approx 1 \mu\text{m} \quad \Delta\theta \approx 1 \text{ mrad}$$

- Модульная структура

Brick Manipulation System

Высокая точность robot-manipulator : заполнение, ежедневная выемка



Установлен с двух сторон, способен заполнять детектор 3000 кирпичами ежедневно

Эффективность, оценка фона



Интенсивность нейтринного пучка в лаборатории Gran Sasso составляет $\sim 4.49 * 10^{-9}$ м⁻² на 1 падающий на мишень протон ($\sim 10^{17}$ протонов в сутки), поперечный размер – около 800 м, средняя энергия ~ 17 ГэВ

При этом в детекторе массой 1250 т ожидается около 40 событий по каналу заряженного тока в сутки. Предполагается, что регистрация будет идти 200 дней в году. Таким образом за пять лет планируется получить $\sim 40\ 000$ событий, связанных с взаимодействиями ν_μ

из них $\sim 5\text{--}15$ событий ν_τ

При обработке эмульсий планируется выделять следующие основные типы событий:

Таблица 1

1	СС взаимодействие ν_μ (обмен W^\pm бозоном)	$\nu_\mu N \rightarrow \mu^\pm X$
2	NC взаимодействие нейтрино (обмен Z^0 бозоном)	$\nu N \rightarrow \nu X$
3	СС взаимодействие ν_e	$\nu_e N \rightarrow e^- X$
4	Взаимодействия с образованием чармированных частиц.	$\nu_\mu N \rightarrow c\bar{\mu}X$ $\nu_\mu N \rightarrow c\bar{c}\mu X$
5	СС взаимодействие ν_τ	$\nu_\tau N \rightarrow \tau^- X$

Основной целью проекта OPERA является выделение событий пятого типа.
 Время жизни τ -лептона $2.9 \cdot 10^{-13}$ с. Основные каналы распада:

$$\tau^- \rightarrow e^- \nu_\tau \bar{\nu}_e X \quad \tau^- \rightarrow \mu^- \nu_\tau \bar{\nu}_\mu X \quad \tau^- \rightarrow h^- \nu_\tau (n\pi^0)$$

Вероятности распадов равны :

18%, 17% , 50%.

OPERA: tau physics search potential

Full mixing, 5 years run, 4.5×10^{19} pot / year and $M_D = 1.3$ Kton

Efficiency before τ identification: $\epsilon_{\text{trigger}} \times \epsilon_{\text{brick}} \times \epsilon_{\text{geom}} \times \epsilon_{\text{vertex location}} = 99\% \times (\geq 70\%) \times 94\% \times 90\%$

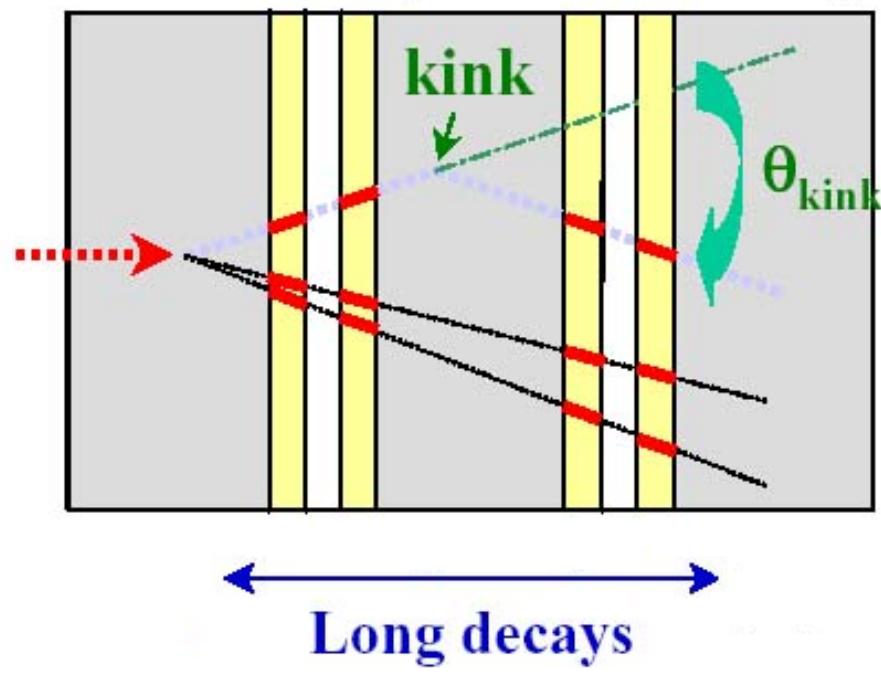
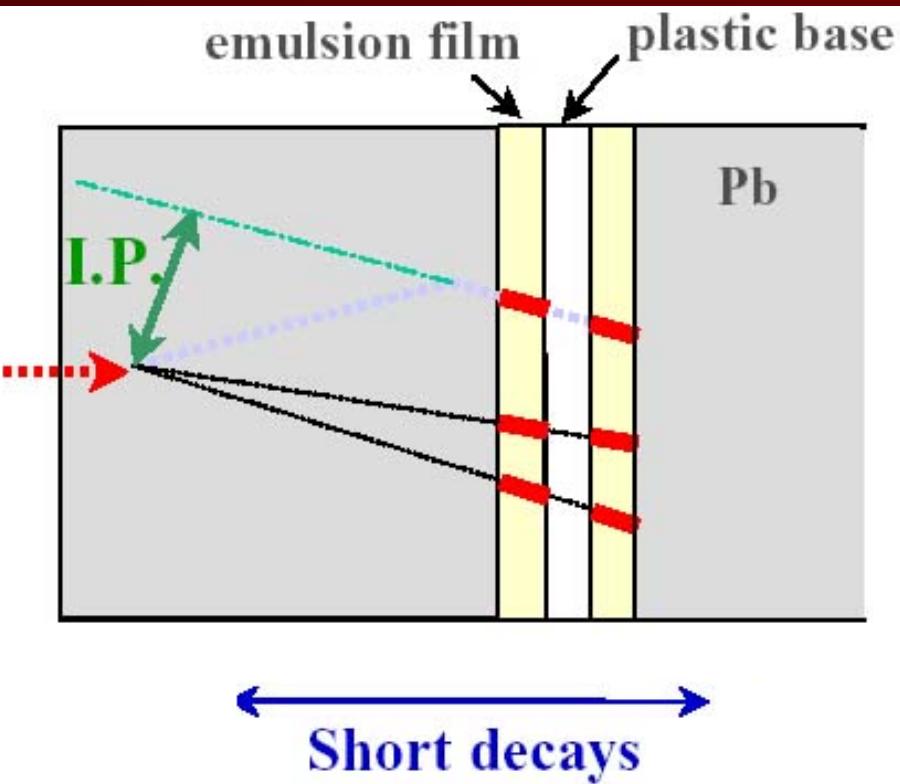
τ decay channels	$\epsilon(\%)$	$\text{BR}(\%)$	Signal		Background
			$\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	$\Delta m^2 = 3.0 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	
$\tau \rightarrow \mu$	17.5	17.7	2.9	4.2	0.17
$\tau \rightarrow e$	20.8	17.8	3.5	5.0	0.17
$\tau \rightarrow h$	5.8	49.5	3.1	4.4	0.24
$\tau \rightarrow 3h$	6.3	15	0.9	1.3	0.17
ALL	$\epsilon \times \text{BR} = 10.6\%$		10.4	14.9	0.75

Expected backgrounds:

- Charmed particles produced in ν_μ CC and NC interaction
- Hadron reinteractions in lead
- Large angle μ scattering: muons produced in ν_μ CC events
- π^0 mis-identification
- ...

Occur if primary muon is not detected and possible wrong charge measurement of secondary muon. Muon ID is very crucial issue for the experiment!

Распады τ -лептона подразделяются на «короткие» и «длинные». Короткий распад происходит в той же свинцовой пластине, в которой произошло первичное взаимодействие, длинный – в одной из последующих. В первом случае отбор события происходит по прицельному параметру (*impact parameter*), который должен превышать величину 5 мкм. Признаком длинного распада является угол излома трека, лежащий в пределах от 20 до 500 мрад.

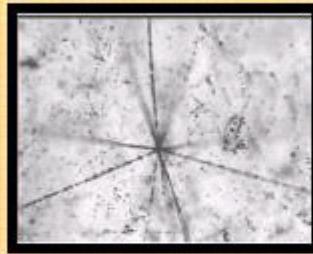


Автоматизация обработки эмulsionий - сканирование

Сканирование эмульсий

ОРЕ

Полная автоматизация обработки



пример события в эмульсии



10 лабораторий в Европе и Японии (1- в России)

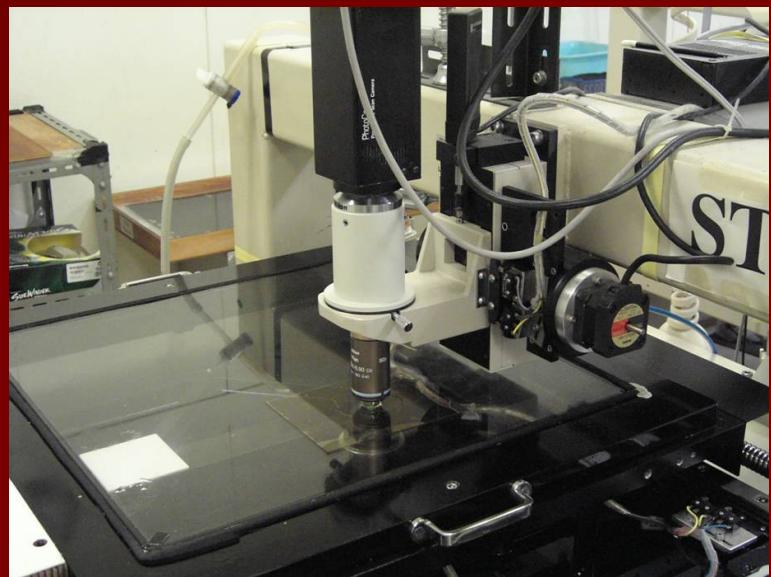
Автоматизированное сканирование:
реконструкция микротреков (45мкм)



*Автоматизированные
микроскопы для обработки
ядерных эмульсий в
лаборатории
Национального
Ядерных
Италии.*



*Сканирующие автоматизированные микроскопы в университете Нагояя,
Япония.*



ПАВИКОМ - 2



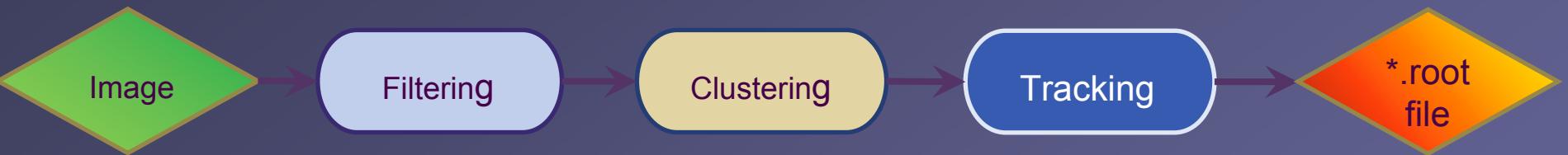
ЛОМО микроскоп

- **Carl Zeiss** стол для сканирования
- Диапазон перемещений X = 120мм, Y = 100мм
- Точность = 0.25 мкм
- Управление через компьютер
- 3.46×10^{-3} мкм – точность определения Z
- **CCD-камера:** 8 бит (256 градаций серого);
1024 градаций серого;
768 x 580 размер матрицы;
1024 размер матрицы;
40 кадр/сек быстродействие;
кадр/сек быстродействие
- **CMOS – камера:** 10 бит
1280 x 500



Сканирующая программа (адаптированный вариант libACQ) выполняет следующие операции:

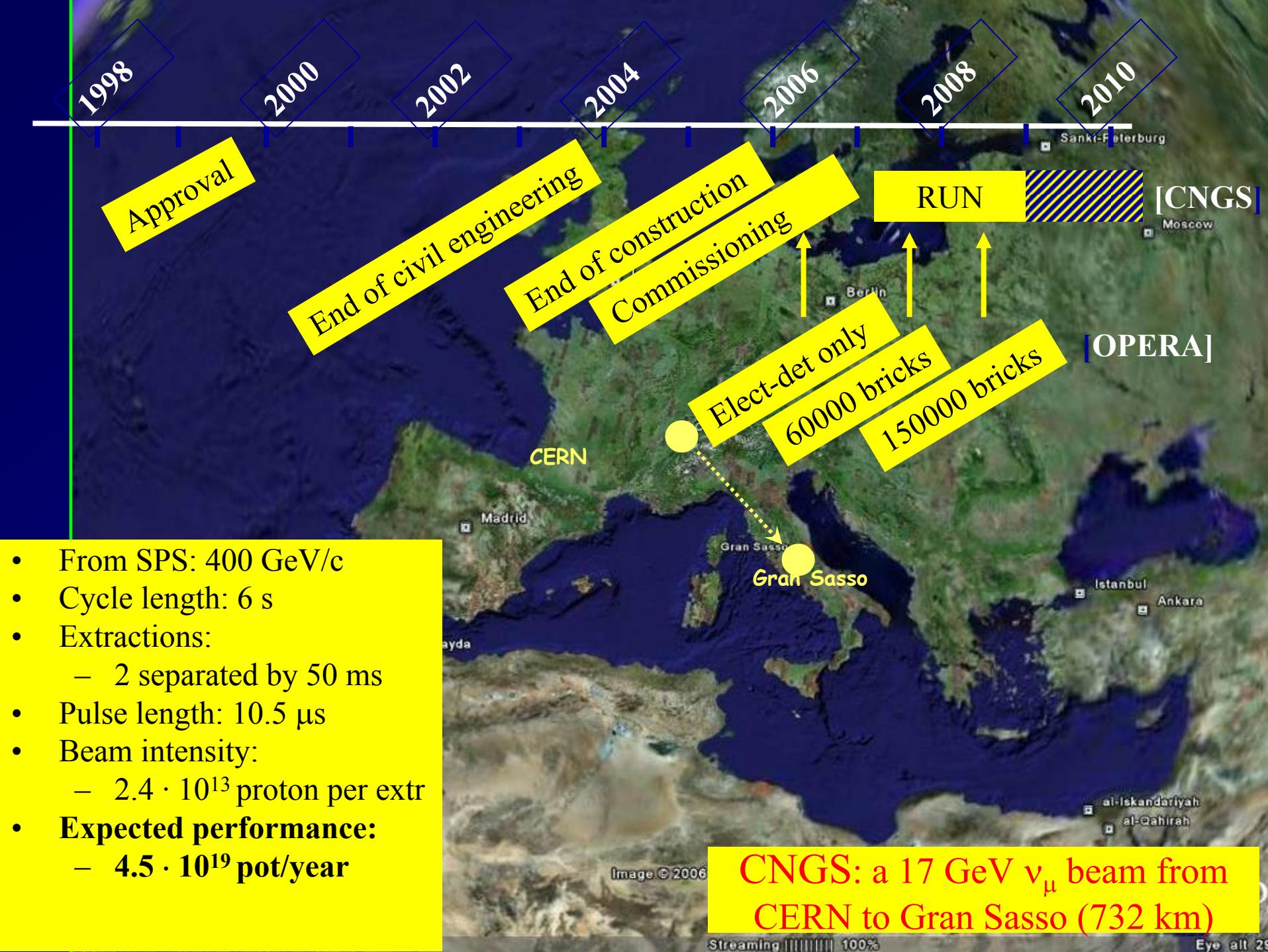
- управление перемещением стола по трем координатам,
 - серийная запись кадров с одновременным движением объектива в плоскости Z (16 кадров на высоте 50 мкм),
 - предварительная обработка изображений - вычитание фона, поиск кластеров (бинаризация, выделение конгломератов пикселей),
 - поиск микротреков по кластерам, сохранение данных в специальном файле формата ROOT.
-
- В результате работы программы образуется файл с расширением .root, который можно использовать для дальнейшей потоковой обработки данных средствами стандартных программных средств эксперимента OPERA.





Таким образом, полный цикл операций для сканирования и одновременной обработки эмульсионных пленок OPERA может проводиться на российском оборудовании.

Планы и первые результаты



- From SPS: 400 GeV/c
- Cycle length: 6 s
- Extractions:
 - 2 separated by 50 ms
- Pulse length: 10.5 μ s
- Beam intensity:
 - $2.4 \cdot 10^{13}$ proton per extr
- **Expected performance:**
 - $4.5 \cdot 10^{19}$ pot/year

September 2003



... 2004



... 2005



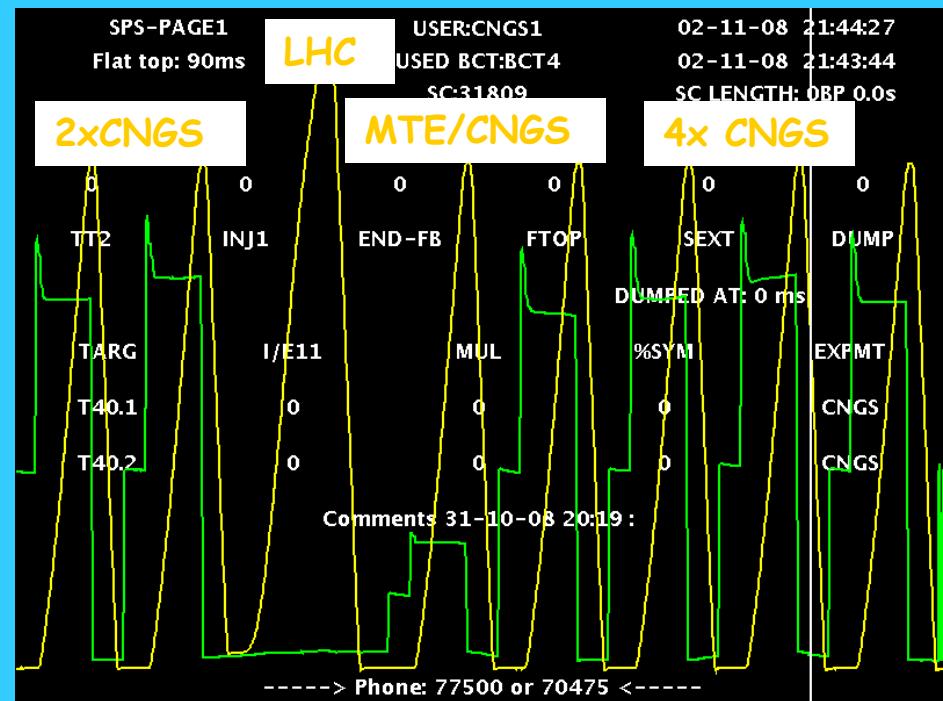
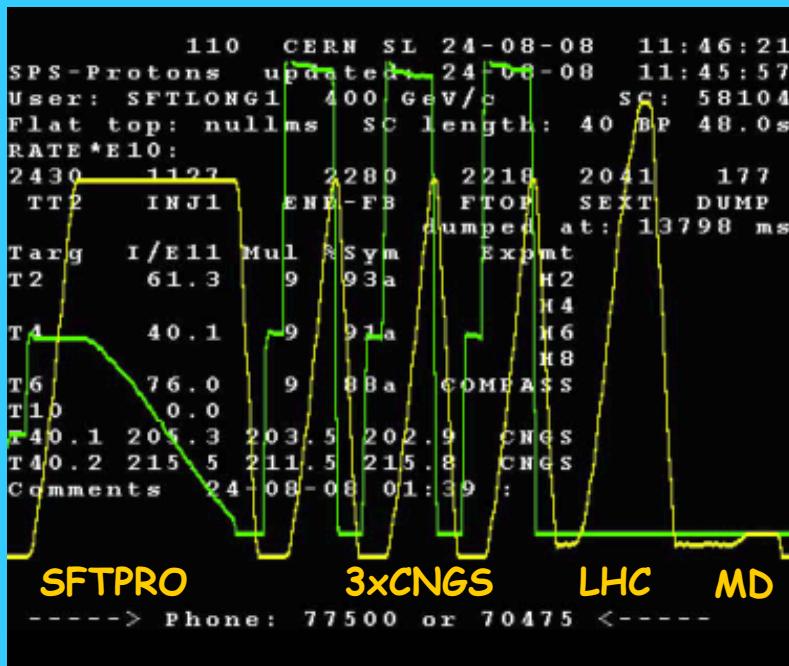
... 2006



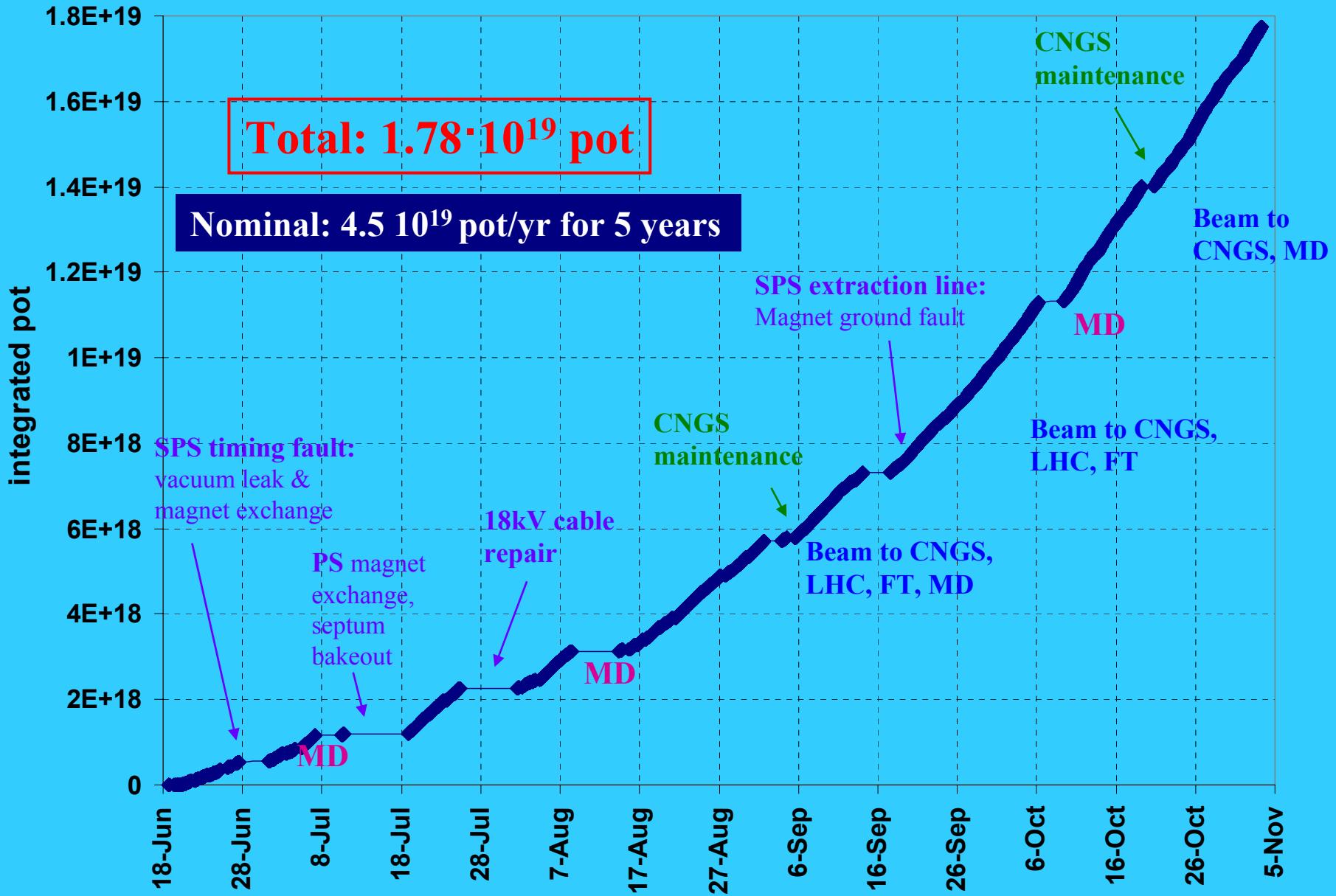
Installation completed with VETO and HPT
before first half of 2007

- 2006 Pilot run: after commissioning in Aug, no follow-up in October due to a problem in the cooling of one horn. Moreover, no bricks in OPERA
- 2007: Major problems in the radiation shielding of the ventilation system. Only $8 \cdot 10^{17}$ pot. Significant interventions during winter shutdown.
- 2008 OPERA fully operational (see below). Performance of the CERN injection complex poor at beginning but steadily improving.
- After the LHC accident, further increase of the integrated intensity for OPERA (duty cycle 37.5% → 83%).

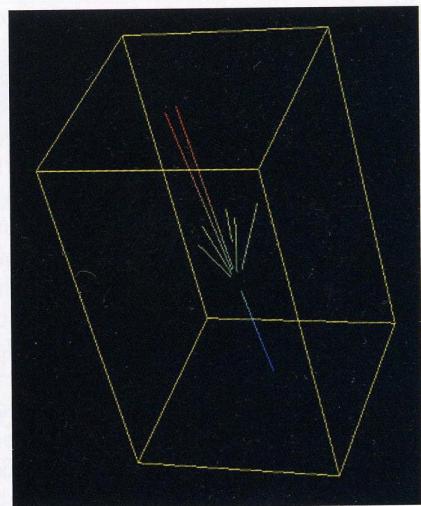
The 2008 run was the first long physics run for the CNGS



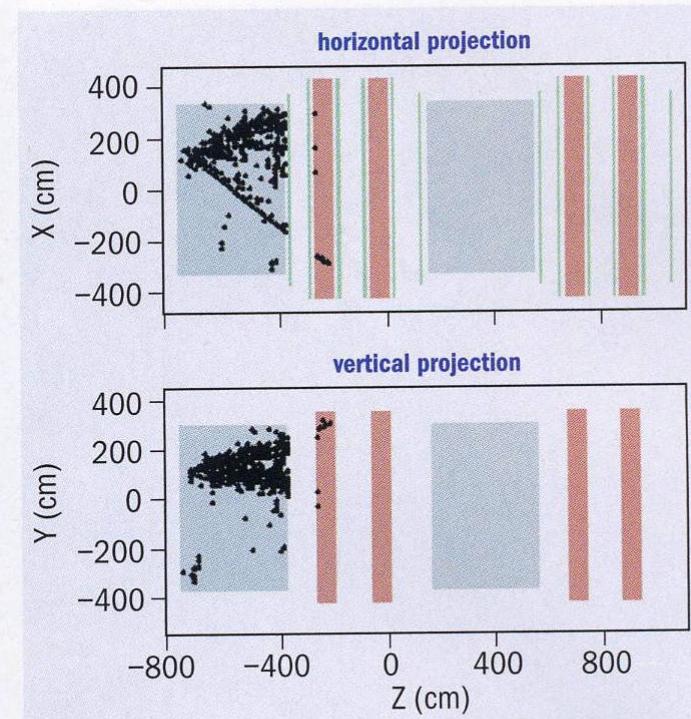
CNGS Run 2008: 18 June- 03 Nov 2008



2006: 1-ый этап – проверка электронных детекторов



Реконструкция точки взаимодействия пиона в кирпиче
эксперимента "OPERA"



Первое событие, связанное с взаимодействием по
каналу заряженного тока, зарегистрированное в
электронных детекторах в августе 2006 года

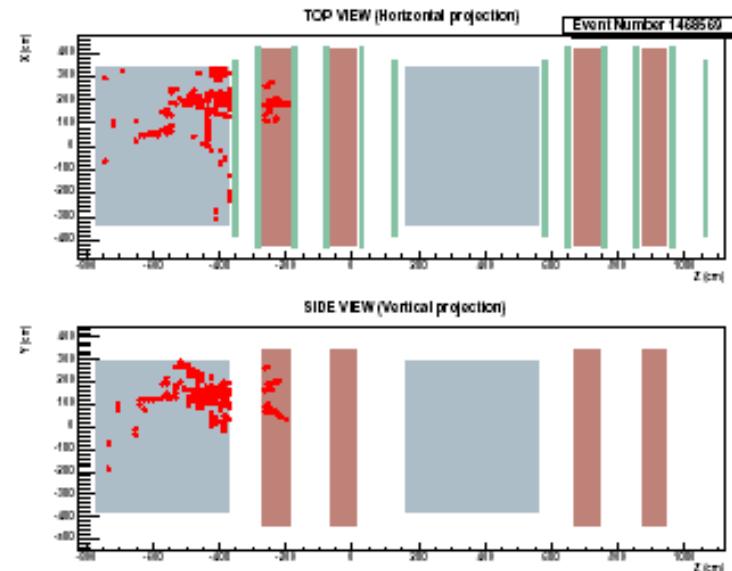
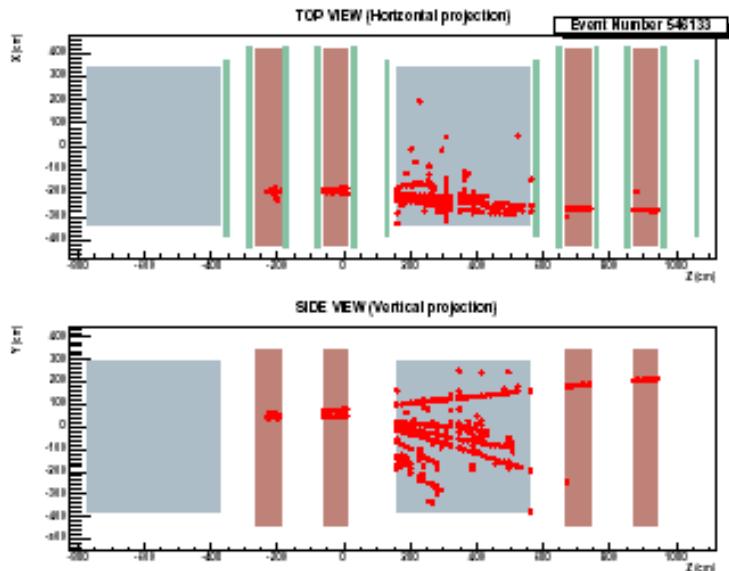
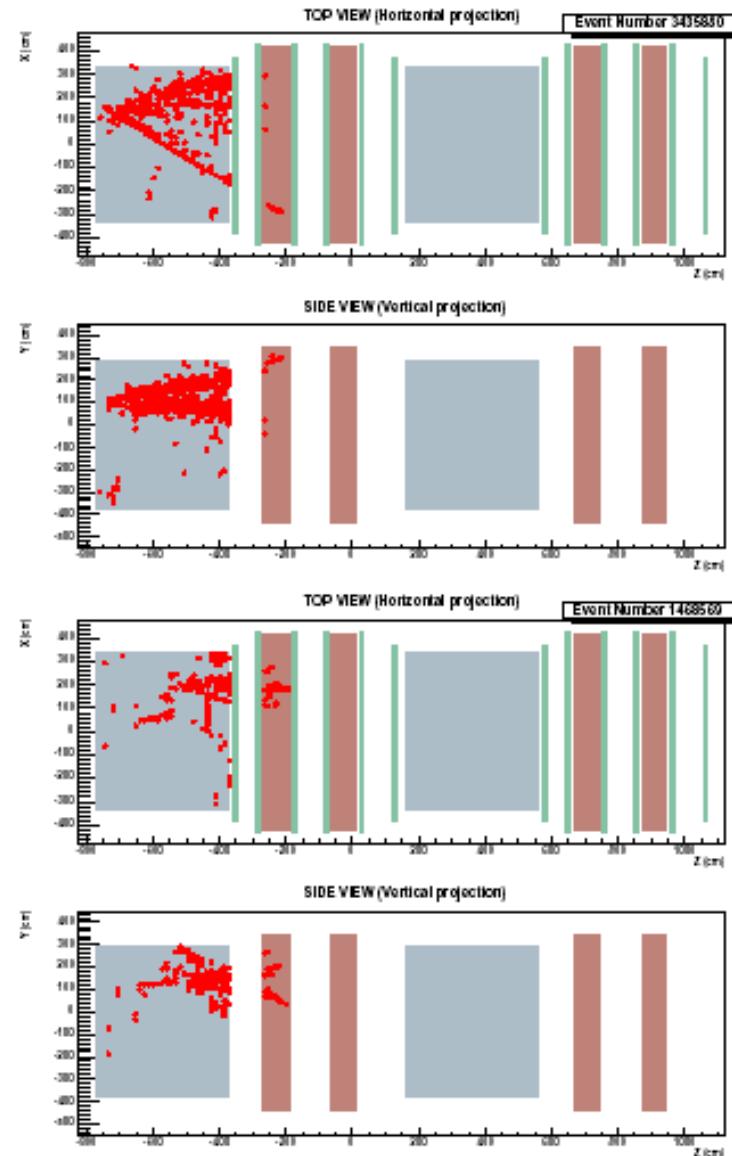
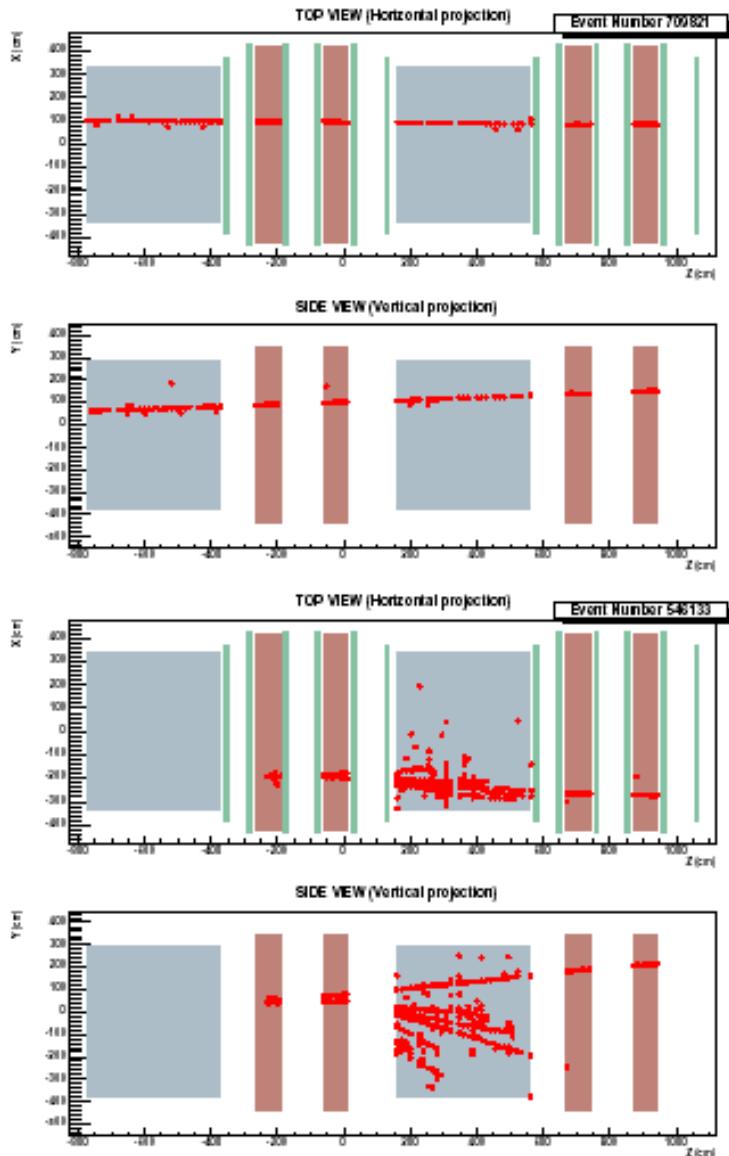
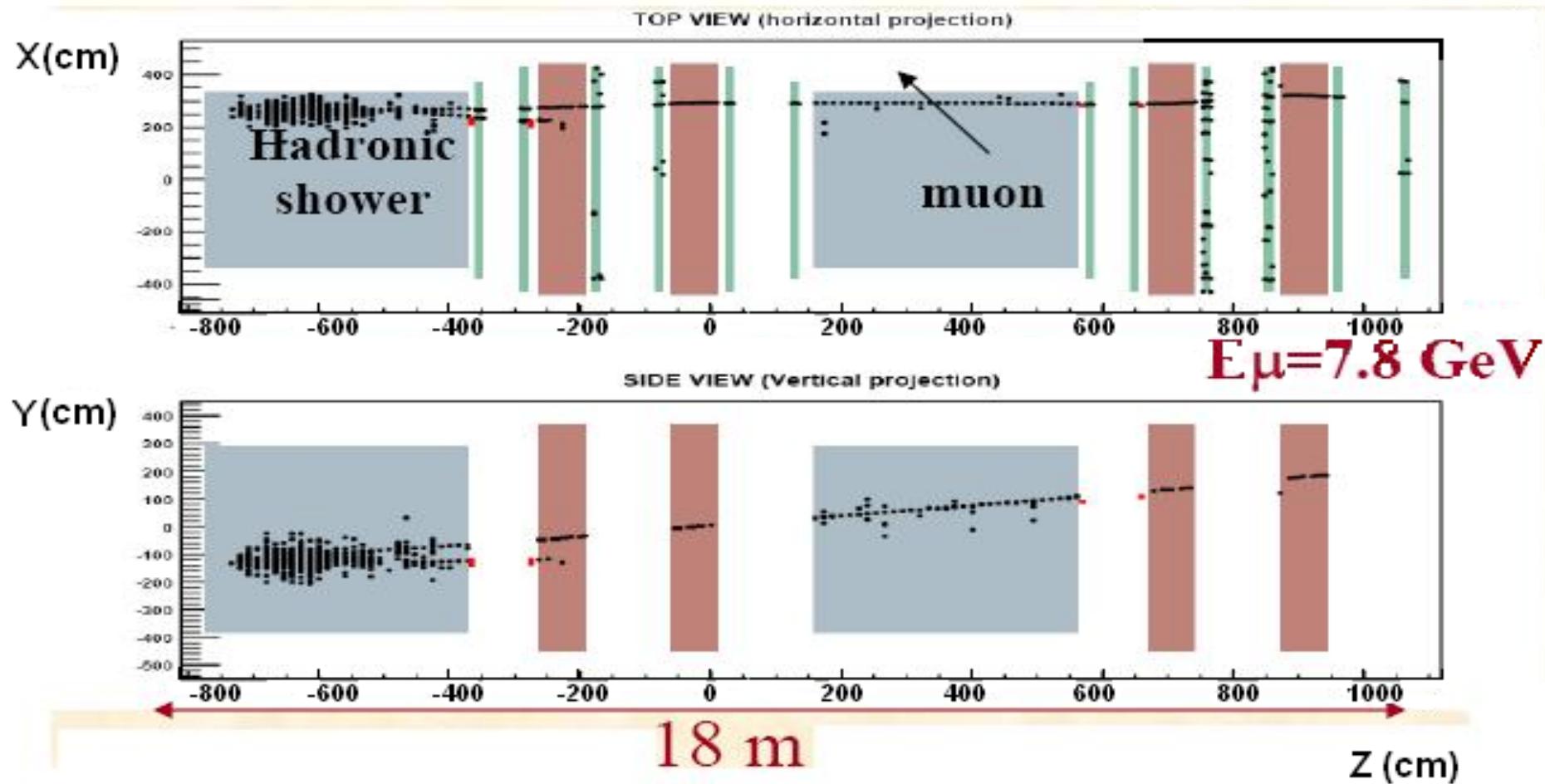
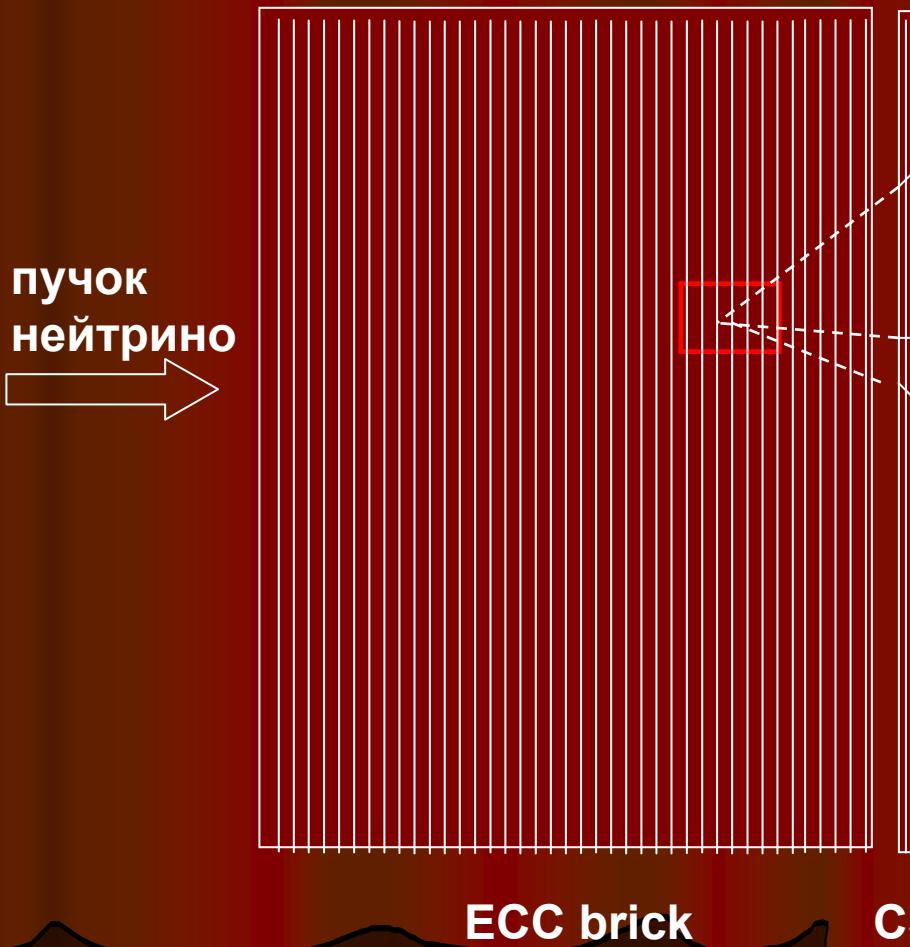


Figure 5: Display of neutrino events from the August run. For each event the top and side views are shown, respectively. The SM targets are indicated in blue, the spectrometer in light brown. TT and RPC hits are indicated in red. See the text for event classification.

2007: физический этап
наблюдение первых событий,
связанных с взаимодействиями
нейтрино, в эмульсии

Первое событие, найденное в эмульсии 02.10.2007г.

Нахождение точки взаимодействия нейтрино в эмульсионном кирпиче

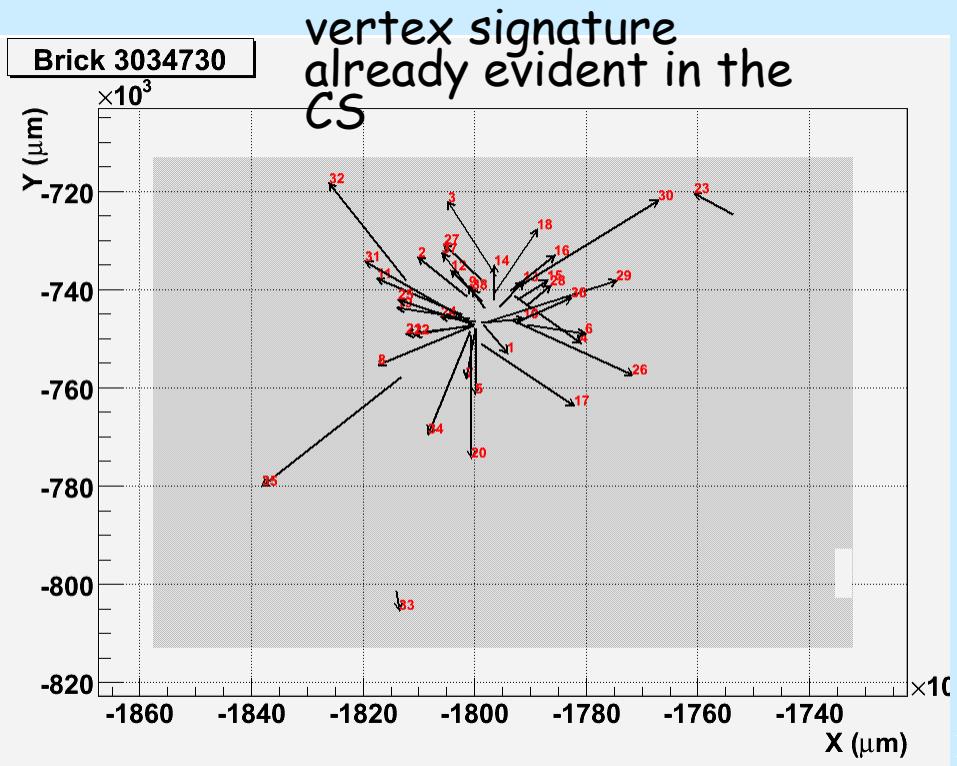
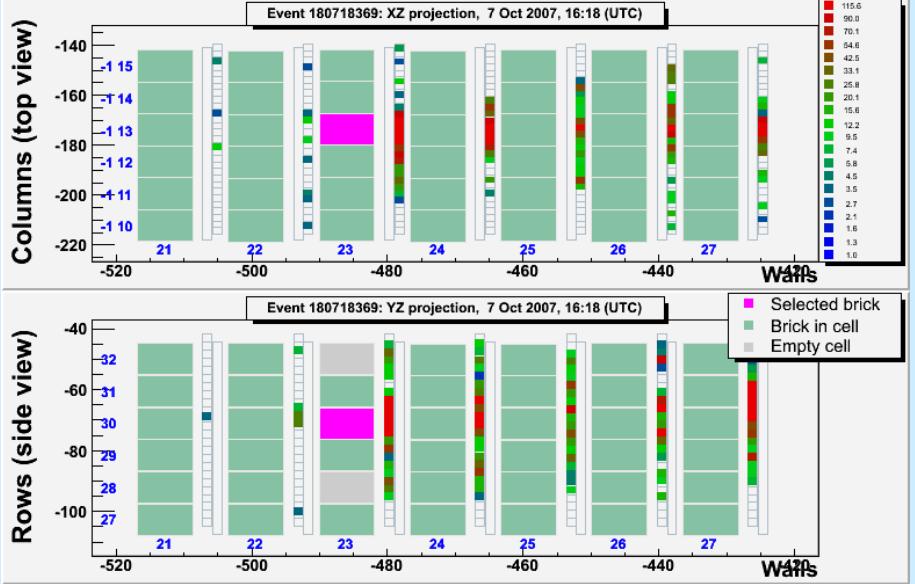


Предсказания CS
используются при
сканировании
эмulsionного кирпича для
нахождении точки
взаимодействия нейтрино

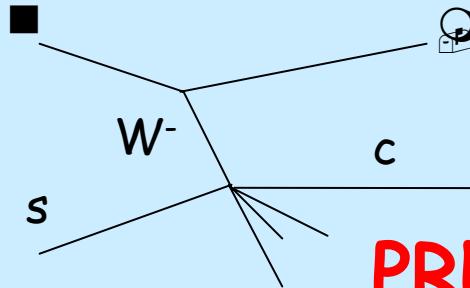


Первые результаты OPERA 2007г.

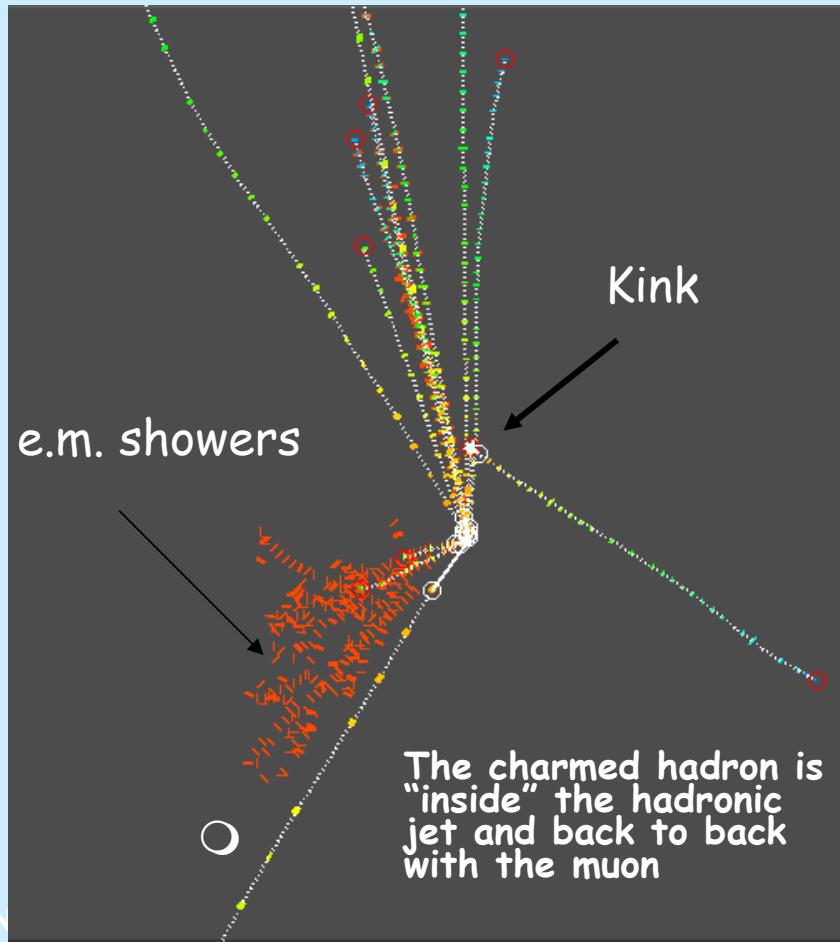
Найдено ~38 событий в эмульсии, из них 29 событий, связанных с взаимодействиями по каналу заряженных токов и 9 событий - по каналу нейтральных токов.

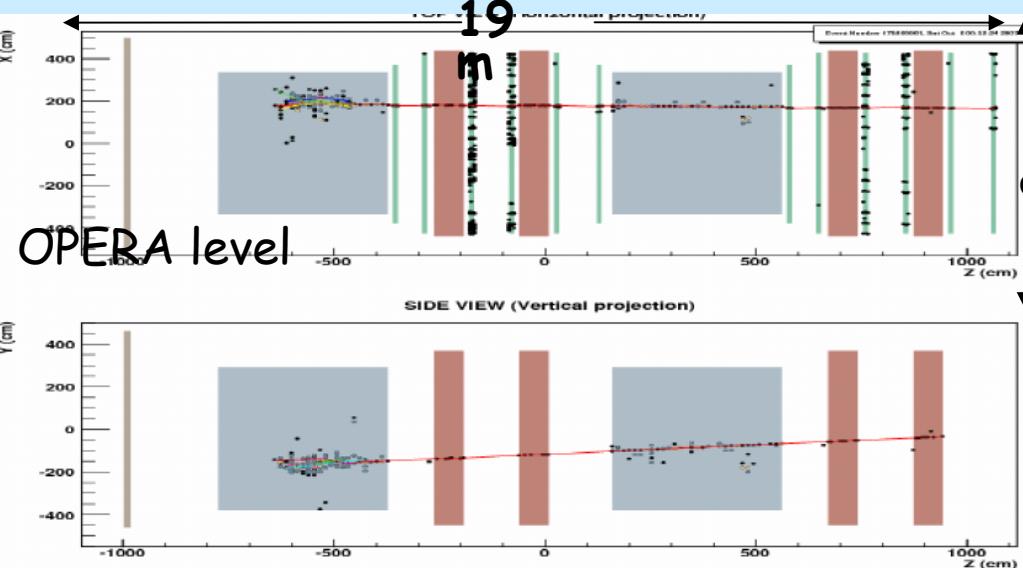
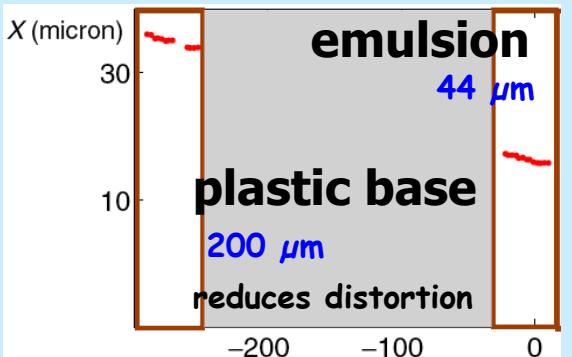


A charm candidate



PRELIMINARY





XY

A beautiful
 ν_μ CC

ECC level

low p
track

4

6

2

μ_1

5

3

pair opening
angle 10 mrad

$E_{\nu_\mu} = 157 \text{ MeV}$

6 prongs

Beam

XZ

YZ



Физический этап эксперимента OPERA показал правильность концепции эксперимента.

Полученные данные позволили провести анализ точностей прослеживания и поиска событий в эмульсионных кирпичах, отработать всю сложную цепь взаимодействий различных групп для получения данных и подготовиться к новому этапу эксперимента.

2008:

Полномасштабный эксперимент

Сеанс 2008

■ Начало: 18 июня -- Окончание 3 ноября

■ 23 недели работы

■ параметры пучка:

число дней	123
эффективность	80%
интенсивность	$2 * 10^{13}$
интегральное число (р.о.т)	$2,28 * 10^{19}$
число взаимодействий в неделю	120

Ожидаемое число взаимодействий:

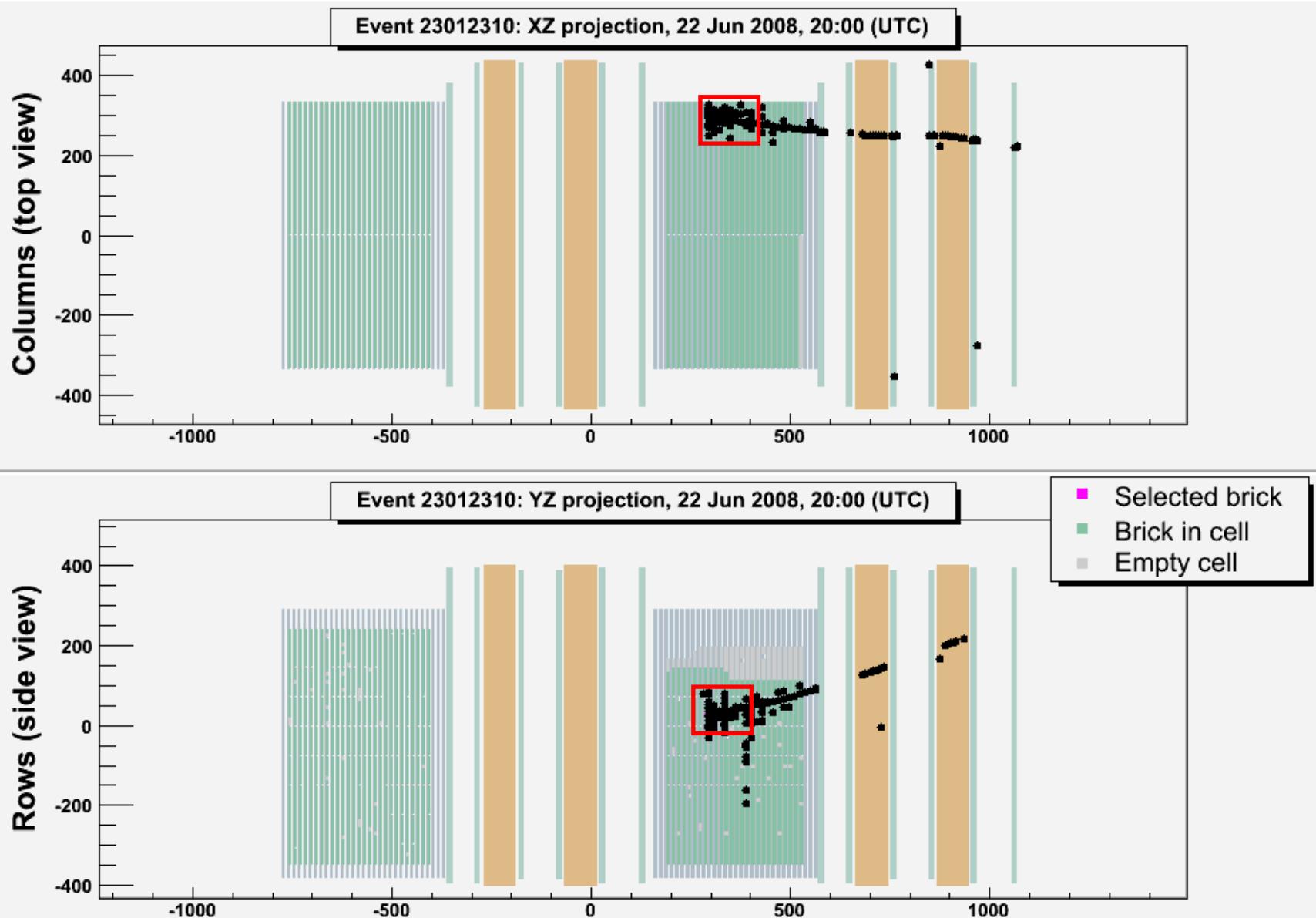
2200 взаимодействий ν_μ нейтрино

$10 \nu_\tau$ нейтрино $\rightarrow 1$ событие (при предполагаемой эффективности)

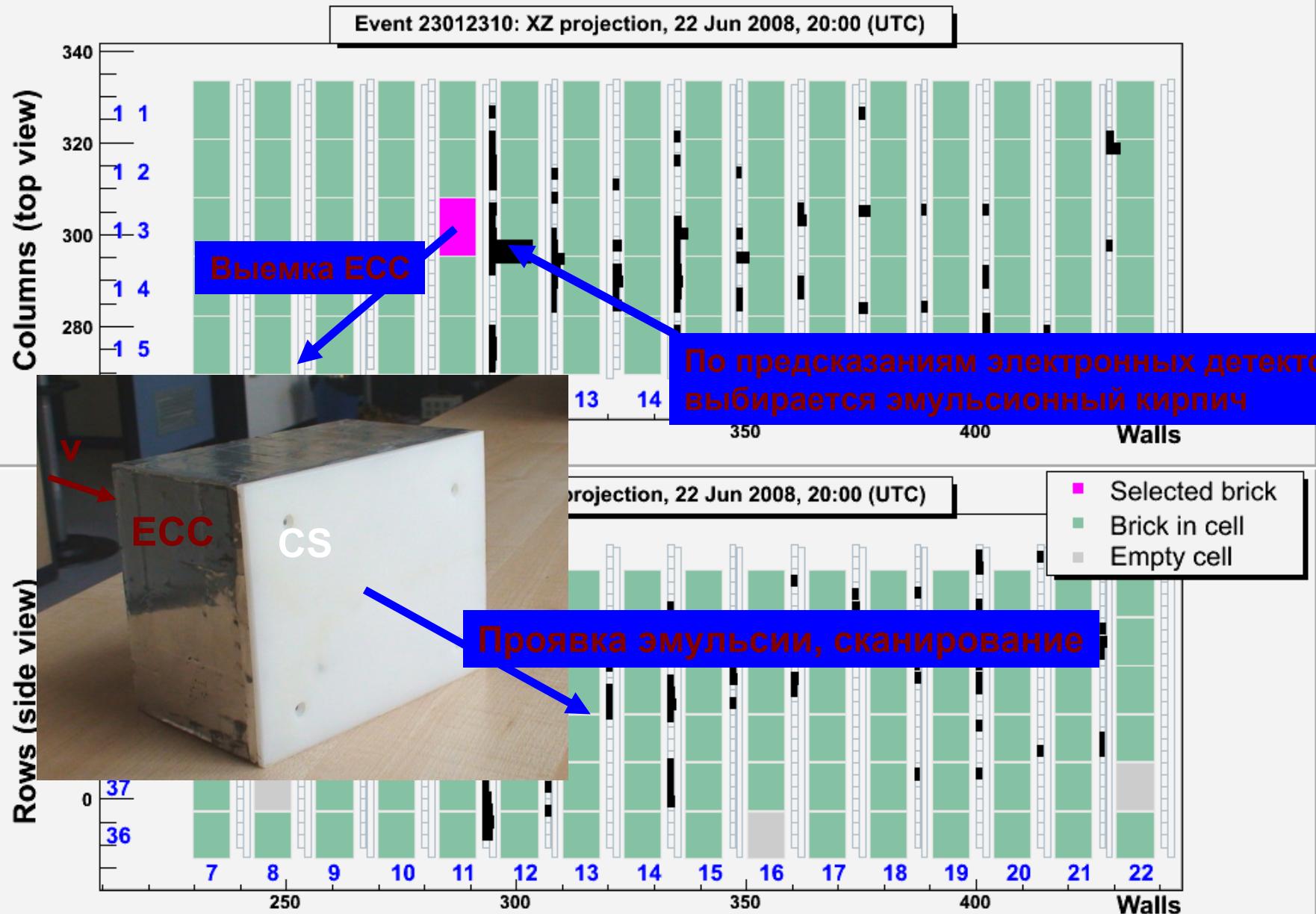
OPERA path: from DAQ to Event Analysis

- Trigger + select “on time” event with CNGS
- Electronic detectors information are processed by a software reconstruction program (*brick finding* algorithm) that selects the brick with the highest probability to contain the neutrino interaction vertex
- The brick is removed by *BMS* and exposed to (*frontal*) *X-rays* to ensure a common reference system between CSd and brick
- The CSd is separated from the brick, developed and analysed in one of the two *Scanning Stations*, located in Europe (LNGS) and in Japan (Nagoya)
- If any track related to the event is found in the CSd, the brick is exposed to (*lateral*) *X-rays* beam and to *cosmic rays* for sheets alignment. The brick is disassembled and the emulsion films are *developed* and sent to one of the scanning labs
- Tracks found in the CSd are searched for in the most downstream film of the brick and followed (*scan-back*)
- A *volume scan* around the neutrino interaction is performed and the neutrino vertex is confirmed
- The scanning lab stores the information about the brick in a local *database*. Information are then copied in one of the two synchronized central databases
- The events are analyzed *off-line* and tau is searched, by accessing to the database

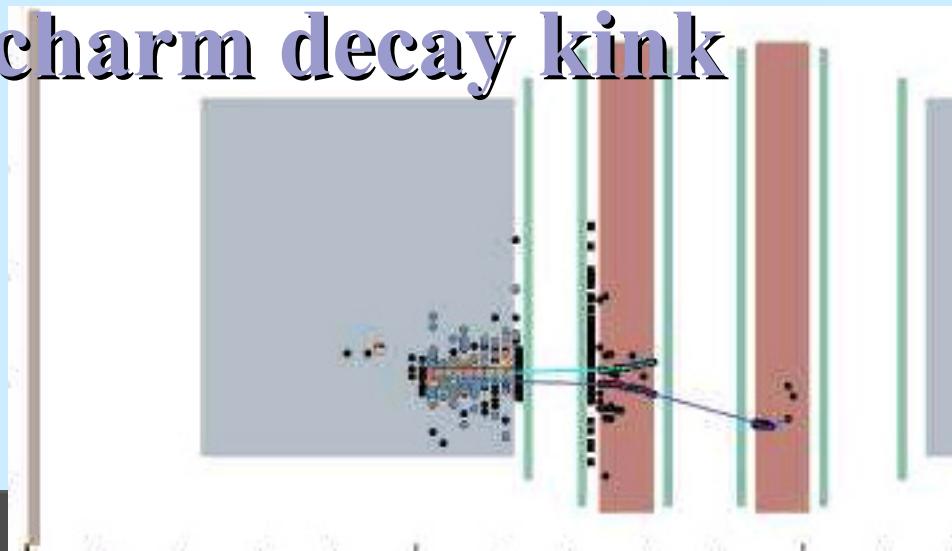
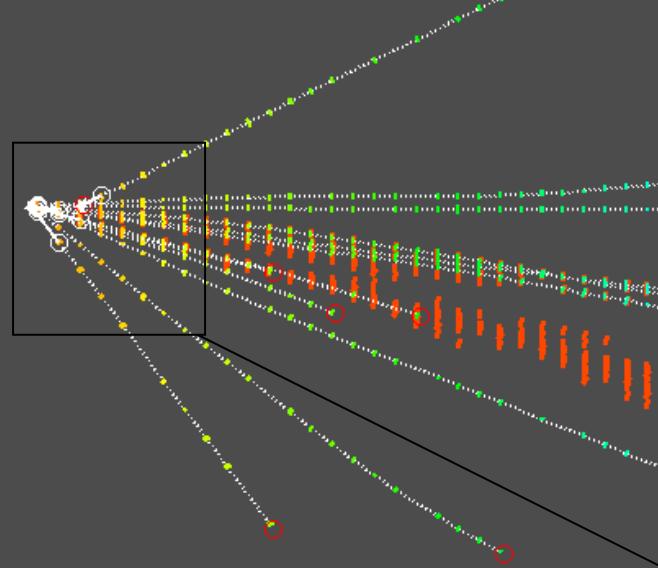
Сеанс 2008 : Пример нейтринного события



Сеанс 2008 : Пример нейтринного события



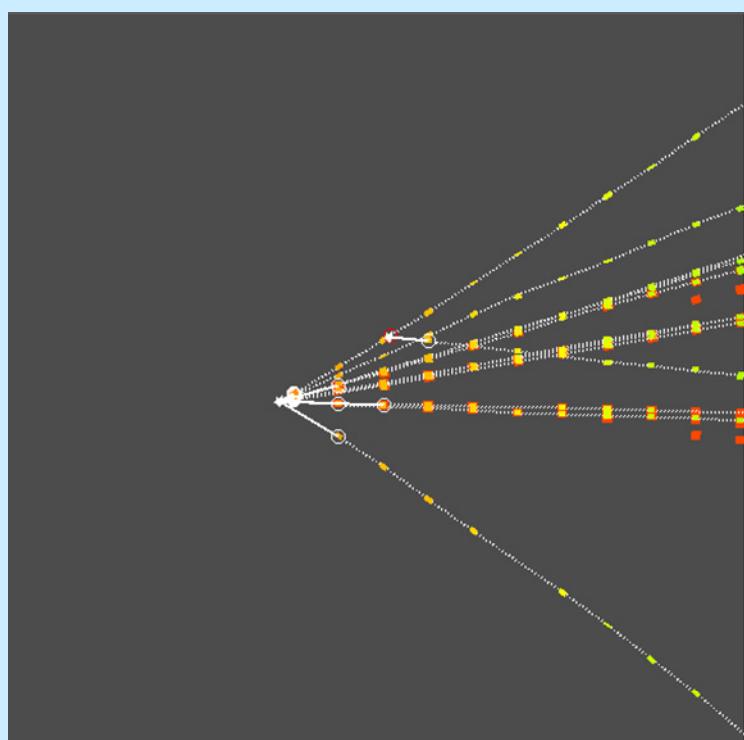
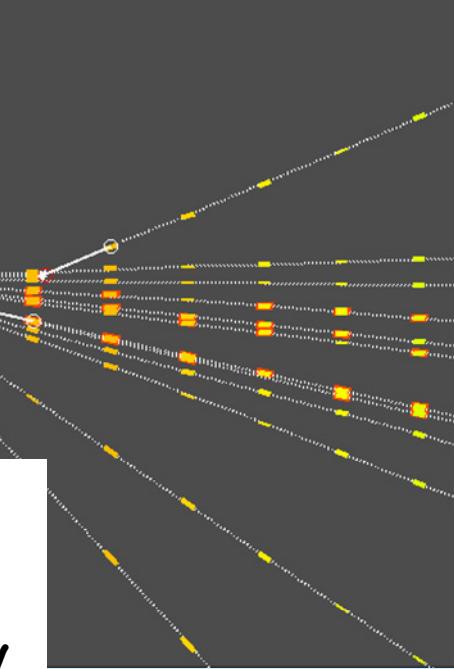
The charm decay kink



Secondary Vertex
(1 prong decay)

kink angle = 0.204 rad
Decay length = 3247 μm

$p(\text{daughter}) = 3.9^{+1.7}_{-0.9} \text{ GeV}$
 $p_t = 796 \text{ MeV}$
 $p_t^{\text{MIN}} = 606 \text{ MeV (90% C.L.)}$



2008 Run: vertex location summary

Events analysis (European set only) @ March 5th 2009

	NC	CC	Total
Bricks assigned	83	441	524
Bricks received in the labs	78	394	472

For the time being
event location with
ONE brick extraction
 $\geq 70\%$

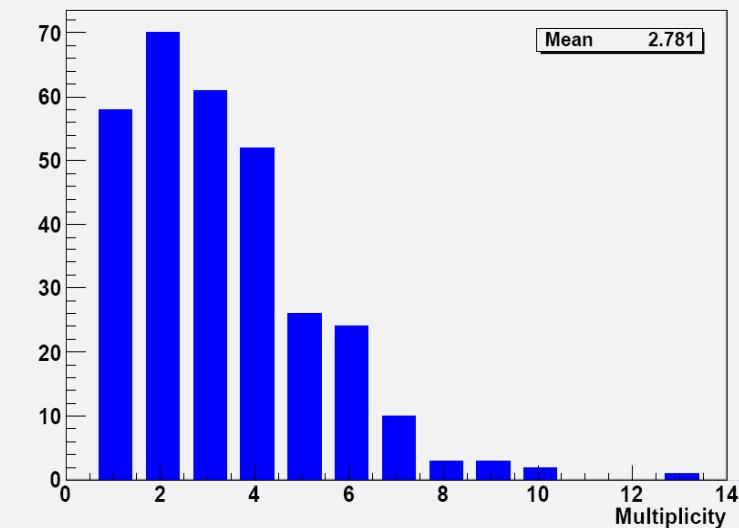
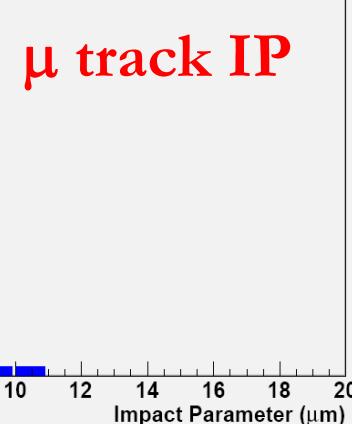
Sc:

CS:

Ve:

Pa:

V ϵ :



Итоги и планы на будущее

Детектор OPERA набирает статистику

OPERA доказала возможность создания эмульсионного детектора кТ массы

Скорость набора данных постоянно нарастает

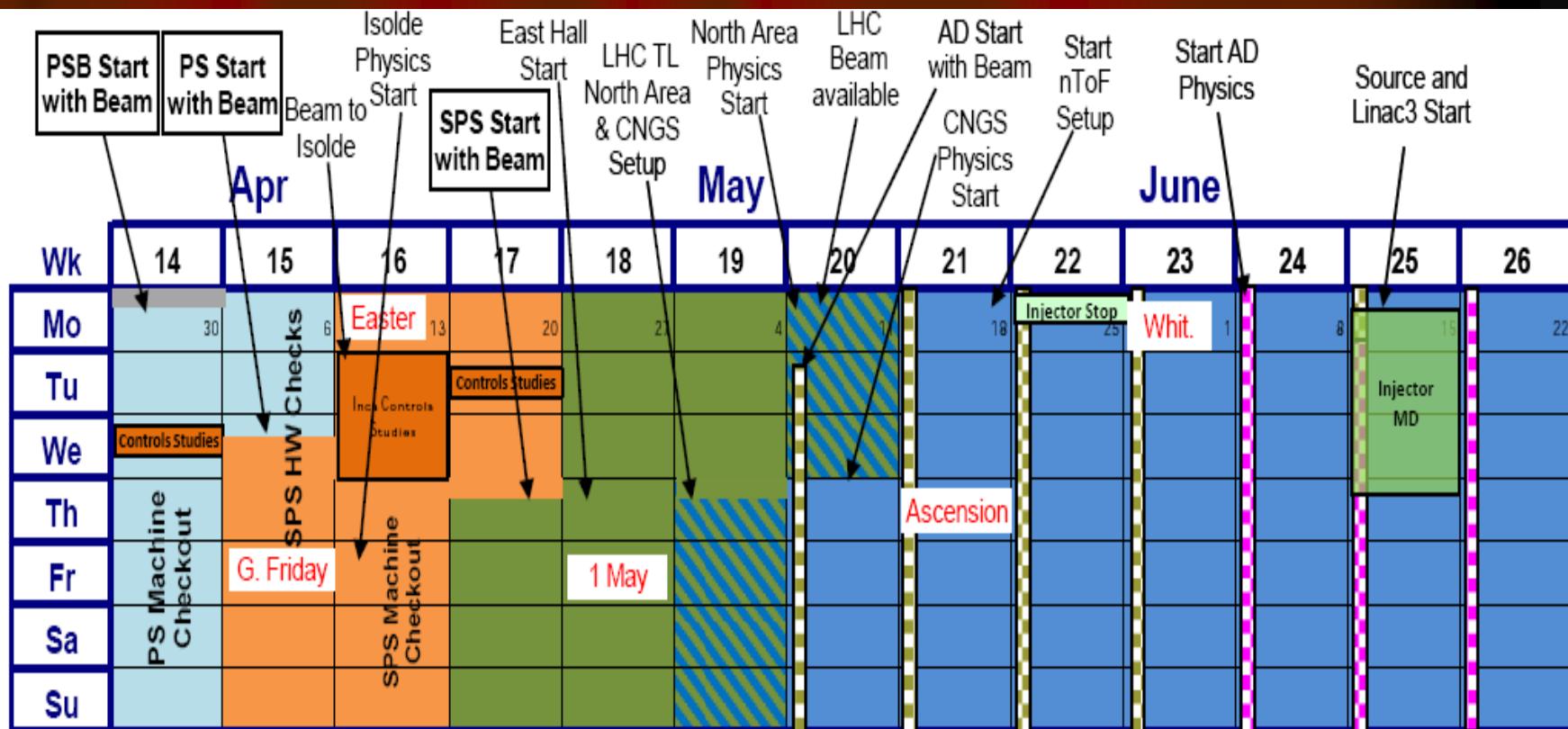
К настоящему моменту: сеанс 2008 начался 18 июня, 120 дней набора статистики

Ожидается 2.28×10^{19} р.о.т. и 1 ν_τ взаимодействие

К настоящему моменту, набрано 1.29×10^{19} р.о.т.

Сеанс 2008 даст важные результаты для эксперимента OPERA :
позволит оценить эффективность и фон (charm,...) и м.б. ~1 ν_τ ???

SPS start-up CNGS beam for Physics RUN: 2009 May 21st



RUN 2009 expectations

173 days

48s supercycle

80% efficiency

2.4×10^{13} pot/extraction

$\rightarrow 3.6 \times 10^{19}$ pot

$\rightarrow 3500$ events of nu interactions

Efforts needed for improving this performance...

With 2008-10 runs
we may be able to exclude
tau appearance with a
reasonable probability

RUN 2010 expectations

$\rightarrow 4.5 \times 10^{19}$ pot

$\rightarrow 450$ nu interactions in OPERA bricks

OR

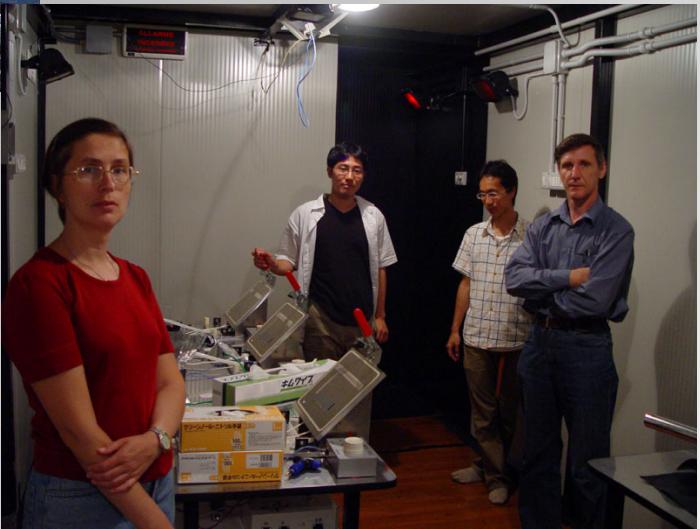
at a not so large probab.
to confirm tau appearance



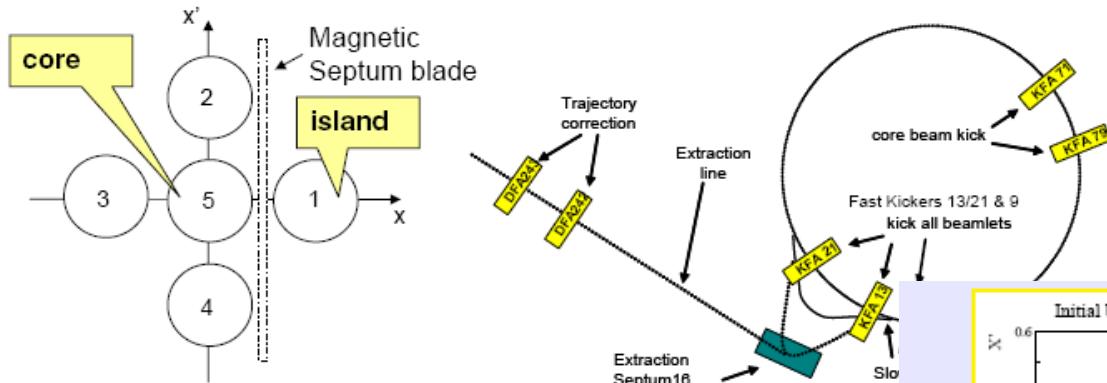
Спасибо за внимание

- V.I. Galkin, T.M. Roganova, G.P. Sazhina, P.A. Publichenko et (OPERA Collab.) // First events from the CNGS neutrino beam detected in the OPERA experiment". New J. Phys. 8, p. 303, (2006).
- Горнушкин Ю.А., Галкин В.И., Роганова Т.М. и др. Поиск осцилляций ν_μ в ν_τ с использованием пучка высокоэнергичных нейтрино из ЦЕРН в Гран-Сассо (эксперимент OPERA) Известия РАН, т.71, №4, (2007), с.594
- Anokhina A.M., Aoki S., Ariga A., ... Galkin V.I., ... Nikitina V.V.,... Osedlo V.I., ... Publichenko P.A., ... Roganova T.M. et al. Study of the effects induced by lead on the emulsion films of the OPERA experiment. Journal of Instrumentation (JINST), v.3,(2008), P07002,17 pp.
- Anokhina A.M., Aoki S., Ariga A., ... Galkin V.I., ... Nikitina V.V.,... Osedlo V.I., ... Publichenko P.A., ... Roganova T.M. et al. Emulsion sheet doublets as interface trackers for the OPERA experiment. Journal of Instrumentation (JINST) , v.3, (2008), P07005,19 pp.
- Acquafredda,A.Anokhina, V.Galkin, V.Nikitina, P.Publichenko, T.Roganova, G.Sazhina et al.The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam....2009 Jinst. V.4, p. P04018
- Агафонова, Ф.М.Анохина, В.И, Галкин, В.В.Никитина, П.А.Публиченко, Т.М.Роганова, Г.П.Сажина и др. Современный статус эксперимента OPERA по наблюдению осцилляций ν_μ в ν_τ в пучке ν_μ . 2009, том.73, №5, с.685-687





- The beam is separated into a central beam and four islands by means of non-linear magnetic elements like sextupoles and octupoles.
- Each beamlet is ejected using fast kickers and a magnetic septum



Multi-turn extraction

Virtually loss-less

- 2001 first proposal (linked to 1.5 intensity increase for CNGS)
- R&D and test 2002-2004
- Implementation study group 2005
- March 2006 TDR
- October 2006 Project approved
- August 2008: First MTE obtained !
- ...2009 ?? ...

Important step for safe achievement of the goal of **22.5×10^{19} pot**

A. Lc

