

DOUBLE CHOOS ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПОИСКУ

©₁₃

В.В. Синев
ИЯИ РАН

План

- ▣ Предыстория
- ▣ Разнообразные проекты по измерению θ_{13}
- ▣ Атомная станция Chooz во Франции
- ▣ Нейтринная лаборатория в Chooz
- ▣ Детектор
- ▣ Ожидаемые результаты
- ▣ Статус на сегодня

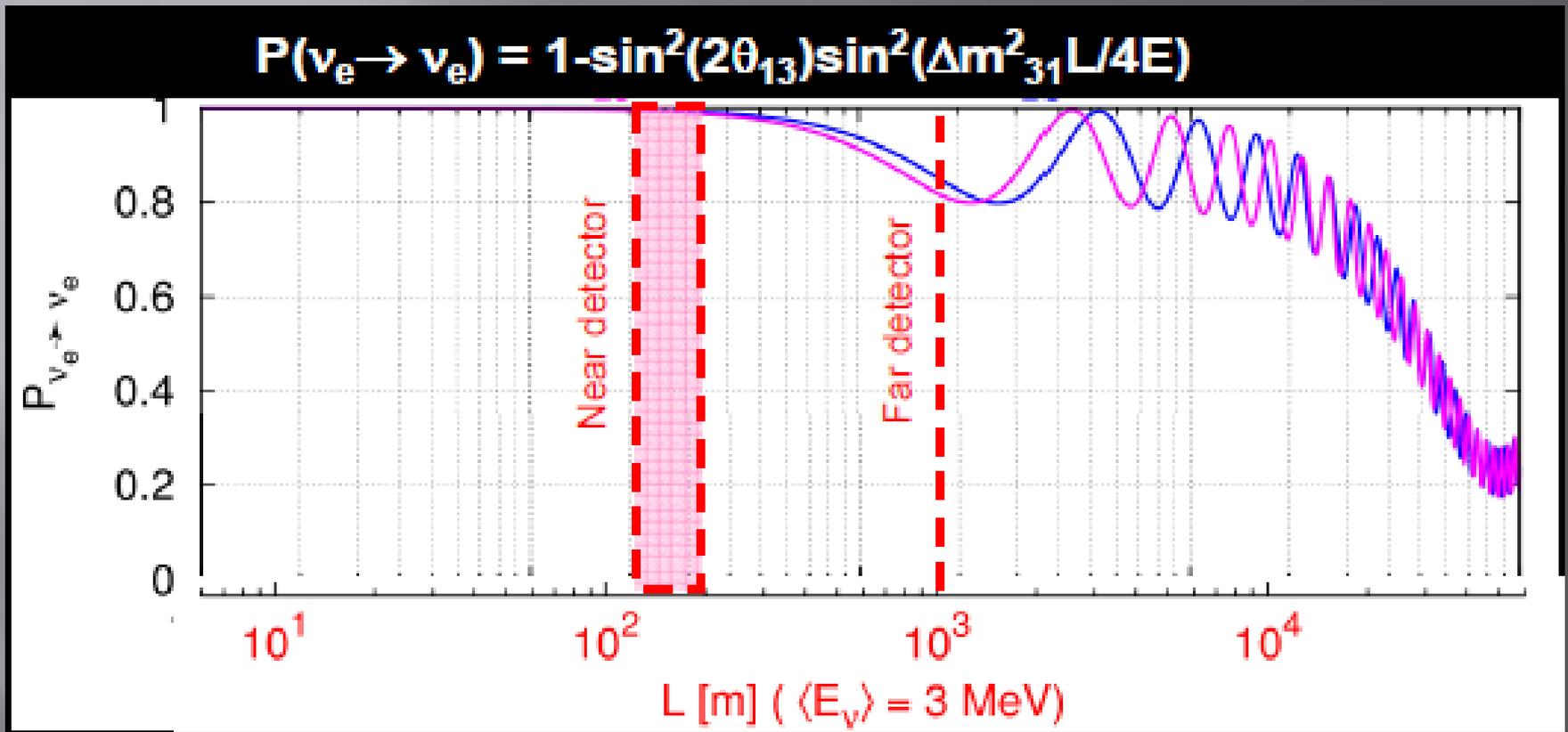
Нейтринные осцилляции

- ▣ Типы нейтрино: ν_e, ν_μ, ν_τ
- ▣ Массовые состояния: ν_1, ν_2, ν_3
- ▣ $|\nu_k\rangle = \sum U_{ki} |\nu_i\rangle$
- ▣ При двух состояниях вероятность флэйвора остаться самим собой на расстоянии L
 $P = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 (1.267 \Delta m^2 L/E_\nu)$
- ▣ Нейтринные источники: Солнце (ν_e), атмосфера ($\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_e, \bar{\nu}_e$), ускорители ($\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_e, \bar{\nu}_e$), реакторы ($\bar{\nu}_e$)

$$\begin{aligned}
1 - P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) &= \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \Delta_{31} \\
&+ \frac{1}{2} c_{12}^2 \sin^2 2\theta_{13} \sin 2\Delta_{31} \sin 2\Delta_{21} \\
&+ c_{13}^4 \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \Delta_{21} \\
&+ c_{12}^2 \sin^2 2\theta_{13} \cos 2\Delta_{31} \sin^2 \Delta_{21},
\end{aligned}$$

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(\Delta m_{atm}^2 L/4E)$$

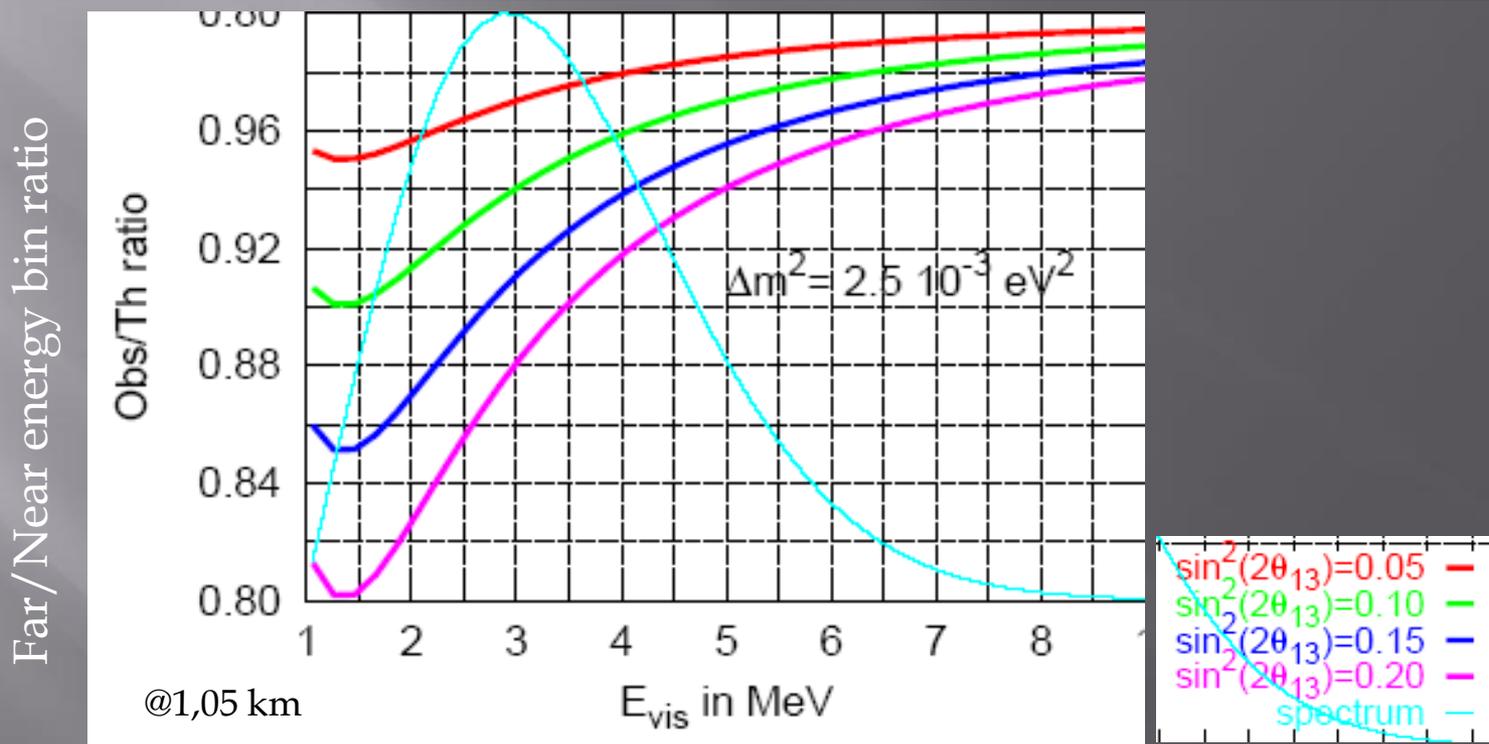
Вероятность нейтрино сохранить свой аромат



Пример ν осцилляций на реакторе

(Double CHOOZ configuration)

Rate + shape information if θ_{13} not too small

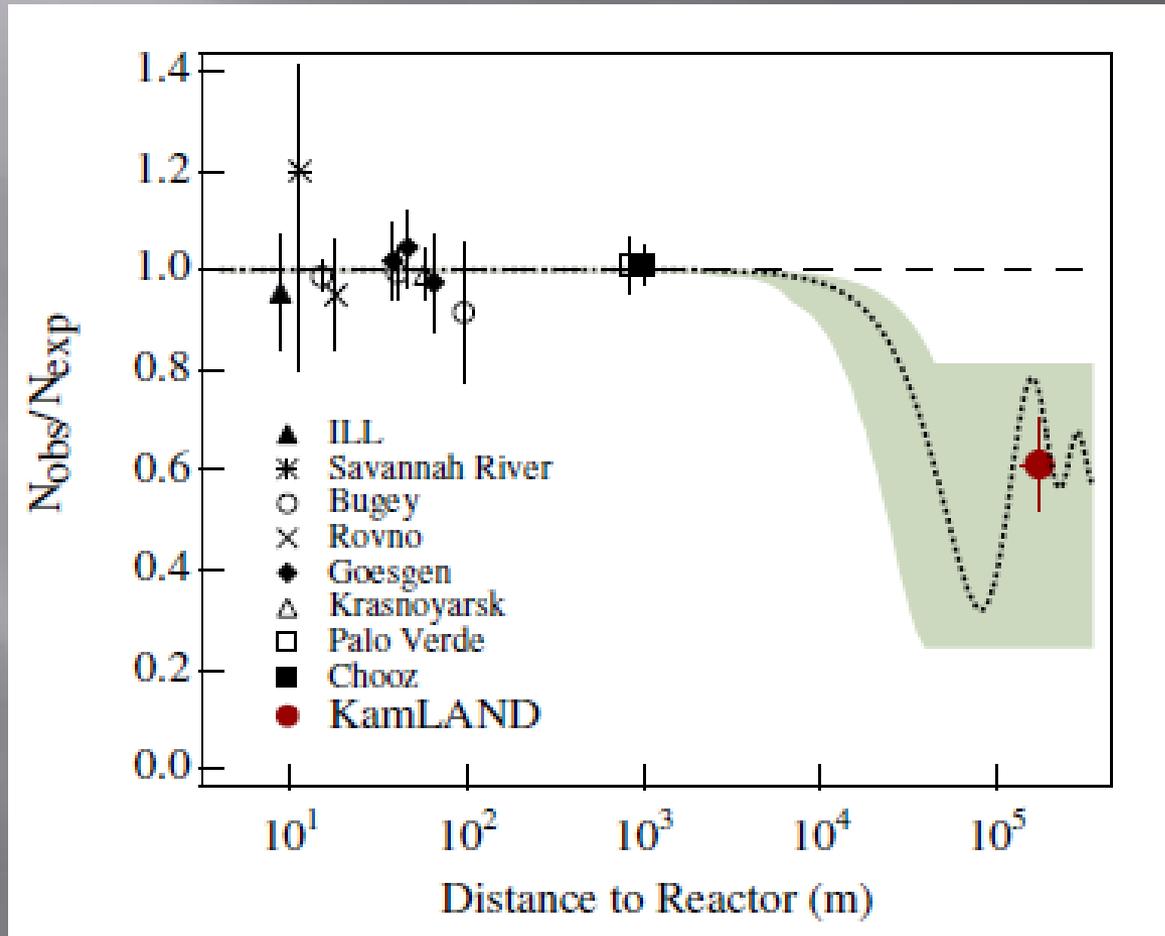


@1,05 km

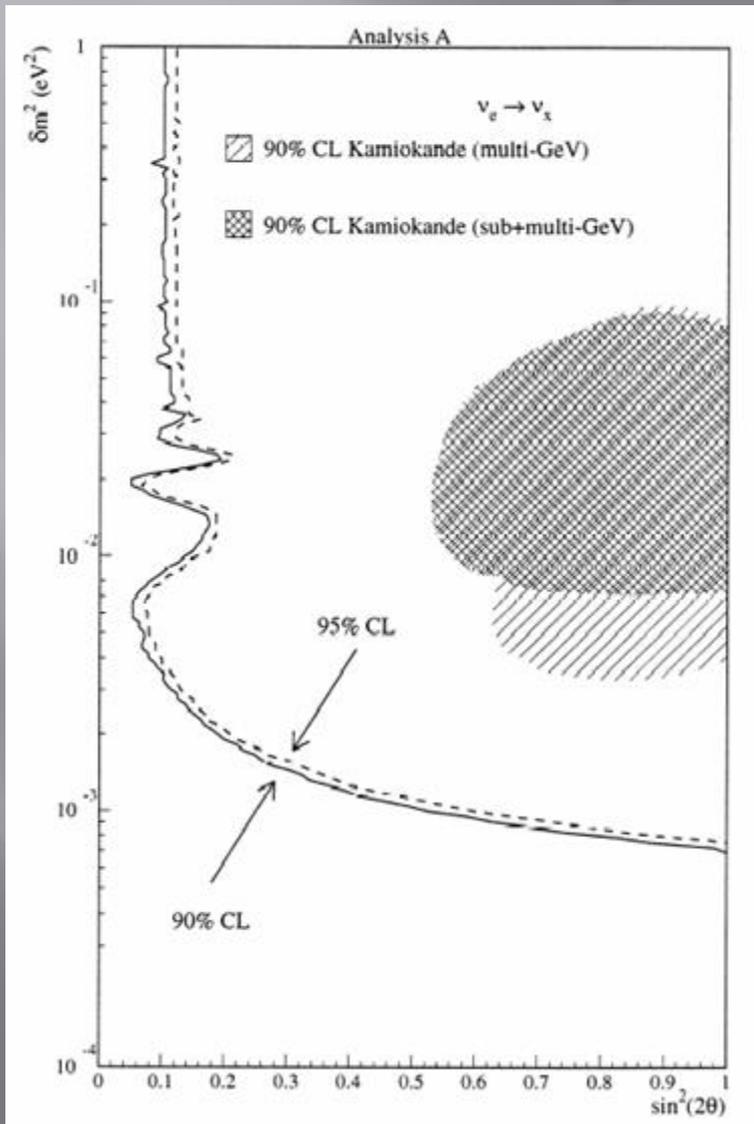
Уже определенные параметры нейтринных осцилляций

- ▣ $\sin^2 2\theta_{12} = 0.87 \pm 0.03$ $\Delta m^2_{12} = (7.59 \pm 0.20) 10^{-5} \text{ eV}^2$
солнечные параметры
- ▣ $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0 (>0.92)$ $\Delta m^2_{23} = (2.43 \pm 0.13) 10^{-3} \text{ eV}^2$
атмосферные параметры
- ▣ В реакторных экспериментах осцилляций не было обнаружено пока не расположили детектор на расстоянии, соответствующим длине осцилляций солнечных параметров (KamLAND)
 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.19 (90\% \text{ CL})$ $\Delta m^2_{13} \sim 2.5 10^{-3} \text{ eV}^2$
- ▣ PDG, 2009

Состояние в экспериментах на реакторах перед Double Chooz

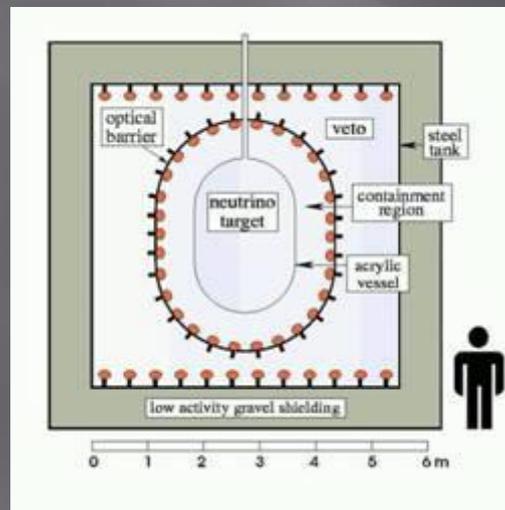
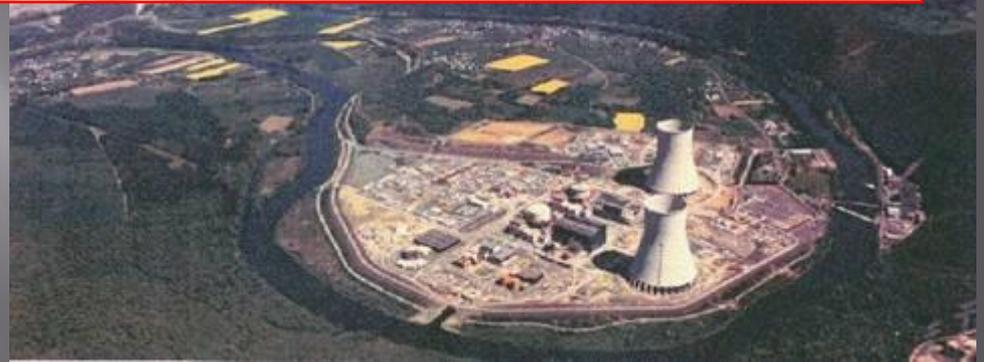


Результат CHOOZ



$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ (disappearance experiment)

$P_{th} = 8.4 \text{ GW}_{th}$, $L = 1.050 \text{ km}$, $M = 5 \text{ t}$
 overburden: 300 mwe



World best constraint!
 @ $\Delta m^2_{atm} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$
 $\sin^2(2\theta_{13}) < 0.2$
 (90% C.L.)

Идея эксперимента

- ▣ После проведения экспериментов CHOOZ и Palo Verde, которые не обнаружили осцилляций на расстояниях ~ 1 км от реактора, были получены ограничения на амплитуду осцилляций 10-20%. Считалось, что $\theta_{13}=0$. Затем возникла идея, как увеличить чувствительность эксперимента. Предложение эксперимента в новой постановке было доложено на конференциях TAUP-99 и NANP-01

**REACTOR
NEUTRINOS**

Neutrino Oscillations at Reactors: What Is Next?*

L. A. Mikaélyan and V. V. Sinev

Russian Research Centre Kurchatov Institute, pl. Kurchatova 1, Moscow, 123182 Russia

Abstract—We briefly review previous and future reactor experiments aimed at searches for neutrino masses and mixing. We also consider the new idea to seek small mixing-angle oscillations in the atmospheric-neutrino-mass-parameter region at Krasnoyarsk. © 2000 MAIK “Nauka/Interperiodica”.

1. INTRODUCTION

The first long-baseline reactor experiment CHOOZ'97 [1] successfully reached the atmospheric-

main goals of the proposed experiment are (1) to obtain deeper insight into the role of the electron neutrino in the atmospheric neutrino anomaly, (2) to obtain new information about neutrino mixing (the U_{e3} element of

После этой публикации состоялась серия Workshop-ов при координации Маури Гудмана (<http://www.hep.anl.gov/ndk/hypertext/>) и определилось несколько экспериментов, которые начали реализовываться в разных странах. В том числе создавалась коллаборация Double Chooz, в которую вошли от России ИЯИ РАН и Курчатовский Институт

Предложение эксперимента

- ▣ В декабре 2002 состоялось первое обсуждение возможности проведения эксперимента на АЭС Chooz на месте эксперимента в 1997 г.
- ▣ В 2004 вышел первый proposal эксперимента hep-ex/0405032, затем окончательный в 2006 hep-ex/0606025
- ▣ Ранее была опубликована white paper (в 2004), где предлагались эксперименты по измерению θ_{13} в различных странах, включая Россию.

WHITE PAPER REPORT on
Using Nuclear Reactors to Search for a
value of θ_{13}
January 2004

K. Anderson¹² J.C. Anjos⁷ D. Ayres⁵ J. Beacom¹⁴
I. Bediaga⁷ A. de Bellefon¹⁵ B.E. Berger⁴
S. Bilenky²⁰ E. Blucher¹² T. Bolton¹⁸ C. Buck²²
W. Bugg²² J. Busenitz² S. Choubey³⁸ J. Conrad¹³
M. Cribier²⁰ O. Dadoun¹⁵ F. Dalnoki-Veress²²
M. Decowski⁸ André de Gouvêa²⁶ D. Demath²⁴
F. Dessages-Ardellier¹⁹ Y. Efremenko³²
F. von Feilitzsch²³ D. Finley¹⁴ J.A. Formaggio⁴⁰
S.J. Freedman^{4,8} B.K. Fujikawa⁴ M. Garbini⁶
P. Giusti⁶ M. Goger-Neff²³ M. Goodman⁵ F. Gray⁸
C. Grieb²³ J.J. Grudzinski²⁵ V.J. Guarino³
F. Hartmann²² C. Hagner²⁰ K.M. Heeger⁵
W. Hofmann²² G. Horton-Smith⁹ P. Huber²³
L. Inzhechik¹⁹ J. Jochum²³ H. Jostlein³⁴ R. Kadel⁵
Y. Kamyshev³² D. Kaplan¹⁶ P. Kasper¹⁴
H. de Kerret¹⁵ J. Kersten²³ J. Klein³⁴
K.T. Knopfle²¹ V. Kopeikin¹⁹ Yu. Kozlov¹⁹
D. Kryn¹⁵ V. Kuchler¹⁴ M. Kuze²⁶ T. Lachenmaier²³
T. Lasserre²⁰ C. Laughton¹⁴ C. Lendvai²³ J. Li¹⁷
M. Lindner²³ J. Link¹³ M. Longo²³ Y.S. Lu¹⁷
K.B. Luk^{5,8} Y.Q. Ma¹⁷ V.P. Martemyanov¹⁹
C. Mauger⁹ H. Menghetti⁶ R. McKeown⁹
G. Mention¹⁵ J.P. Meyer²⁰ L. Mikaelyan¹⁹
H. Minakata²⁷ D. Naples²⁷ H. Nunokawa¹¹
L. Oberauer²³ M. Obolensky¹⁵ S. Parke¹⁴
S.T. Petcov^{20,28} O.L.G. Peres¹⁰ W. Potzel²³
J. Pilcher¹² R. Plunkett¹⁴ G. Raffelt²² P. Rapidis¹⁴
D. Reyna⁵ B. Roe²³ M. Roññec²³ Y. Sakamoto²⁸

Double Chooz: A Search for the
Neutrino Mixing Angle θ_{13}

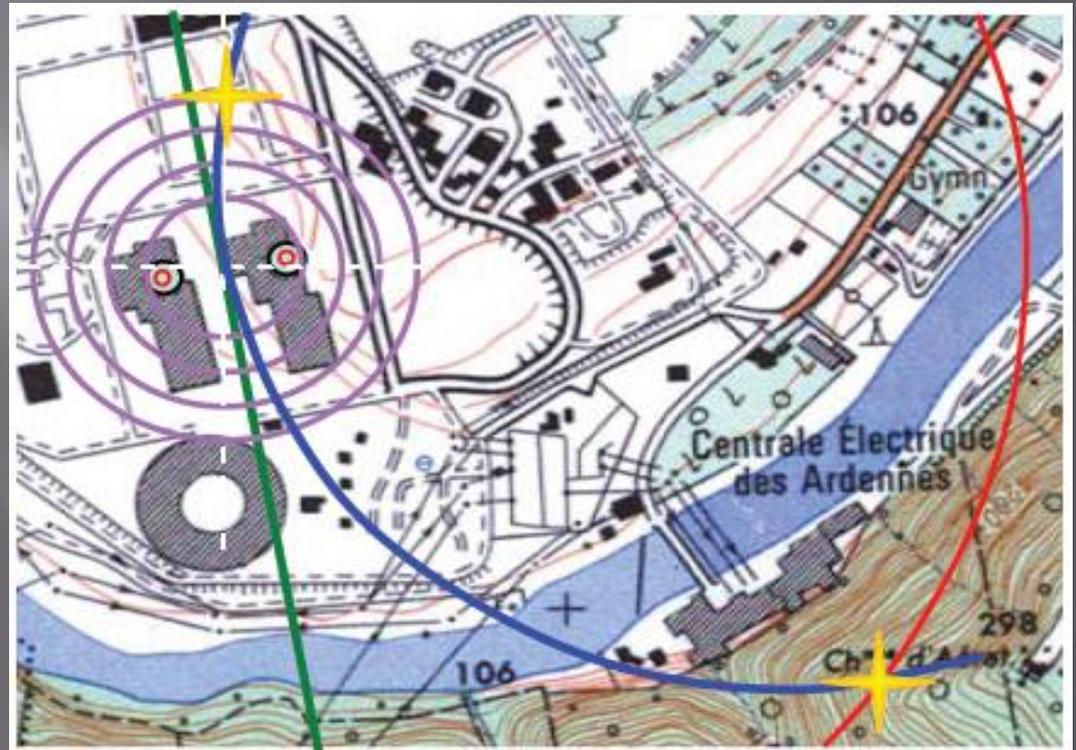
F. Ardellier¹⁹ I. Barabanov¹⁰ J. C. Barrière¹⁹ F. Beißel¹
S. Berridge²³ L. Bezrukov¹⁰ A. Bernstein¹⁴ T. Bolton¹²
N.S. Bowden²⁰ Ch. Buck¹⁶ B. Bugg²³ J. Busenitz² A. Cabrera⁴
E. Caden⁶ C. Cattadori^{7,17} S. Cazaux¹⁹ M. Cerrada⁵ B. Chevis²³
H. Cohn²³ J. Coleman¹⁵ S. Cormon²¹ B. Courty⁴ A. Cucoanes¹
M. Cribier^{4,19} N. Danilov¹¹ S. Dazeley¹⁵ A. Di Vacri⁷
Y. Efremenko²³ A. Etenko¹³ M. Fallot²¹ C. Fernández-Bedoya⁵
F. von Feilitzsch²² Y. Foucher²¹ T. Gabriel²³ P. Ghislain⁴
I. Gil Botella⁵ G. Giurgiu³ M. Goeger-Neff²² M. Goodman²⁴
D. Greiner²⁴ Ch. Grieb²² V. Guarino³ A. Guertin²¹ P. Guillouet⁴
C. Hagner⁸ W. Hampel¹⁶ T. Handler²³ F. X. Hartmann¹⁶
G. Horton-Smith¹² P. Huber^{22,12} J. Jochum²⁴ Y. Kamyshev²³
D. M. Kaplan⁹ H. de Kerret⁴ T. Kirchner²¹ V. Kopeikin¹³
J. Kopp²² A. Kozlov²³ T. Kutter¹⁵ Yu. S. Krylov¹¹ D. Kryn⁴
T. Lachenmaier²⁴ C. Lane⁶ T. Lasserre^{4,19a} C. Lendvai²² Y. Liu²
A. Letourneau¹⁹ D. Lhuillier¹⁹ M. Lindner²² J. LoSecco¹⁸
I. Machulin¹³ F. Marie¹⁹ J. Martino²¹ D. McKee⁵ R. McNeil¹⁵
F. Meigner¹⁹ G. Mention¹⁹ W. Metcalf¹⁵ L. Mikaelyan¹³
A. Milstajin¹⁹ J. P. Meyer¹⁹ D. Motta¹² L. Oberauer²²
M. Obolensky⁴ C. Palomares⁵ P. Perrin¹⁹ W. Potzel²²
J. Reichenbacher³ B. Reinhold¹ D. Reyna³ M. Rolinac²²
L. Romero⁵ S. Roth¹ S. Schoenert¹⁶ U. Schwan¹⁶ T. Schwetz²²
L. Seola¹⁹ V. Sinev^{13,19} M. Skorokhvatov¹³ A. Stahl¹ I. Stancu²
N. Stanton¹² S. Sukhotin^{4,13} R. Svoboda^{14,15} A. Tang¹²
A. Tonazzo⁴ D. Underwood³ F.J. Valdivia⁵ D. Vignaud⁴
D. Vincent⁴ W. Winter²² K. Zbiri²¹ R. Zimmermann⁸

21st June 2006

arXiv:hep-ex/0606025 v2 20 Jun 2006

1 реактор – 2 детектора

- ▣ 2 реактора – 2 детектора. Условие: равенство вкладов потоков от реакторов в каждом детекторе. Тогда реакторы могут рассматриваться как один.
- ▣ Детекторы должны быть идентичными, с возможно большей точностью.



Предложения по постановке эксперимента по поиску θ_{13}

- ~~□ Krasnoyarsk (Russia) 1 reactor~~
- ~~□ Wolf Creek (USA) 1 reactor~~
- ~~□ Diablo Canyon (USA) 2 reactors~~
- ~~□ Breidwood (USA) 2 reactors~~
- ~~□ Kashiwa-Kariwasaki (Japan) 7 reactors~~
- Angra (Brazil) 1 reactor
- Daya Bay (China) 2 + 4 reactors
- RENO (Korea) 6 reactors
- Double Chooz (France) 2 reactors

Daya Bay (Daya Bay & Ling Ao)



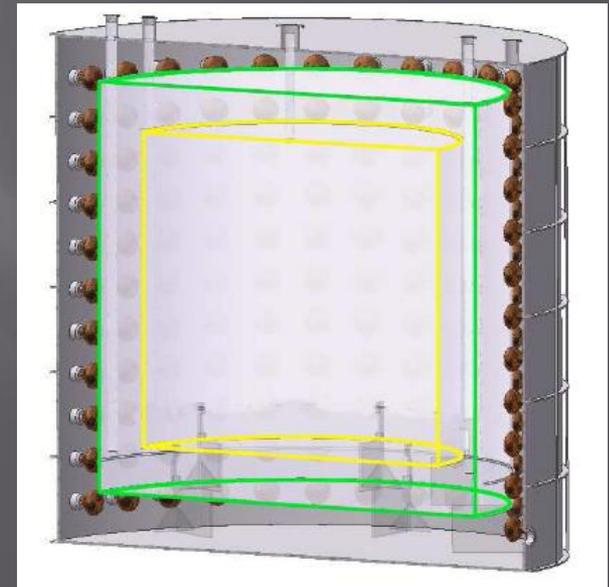
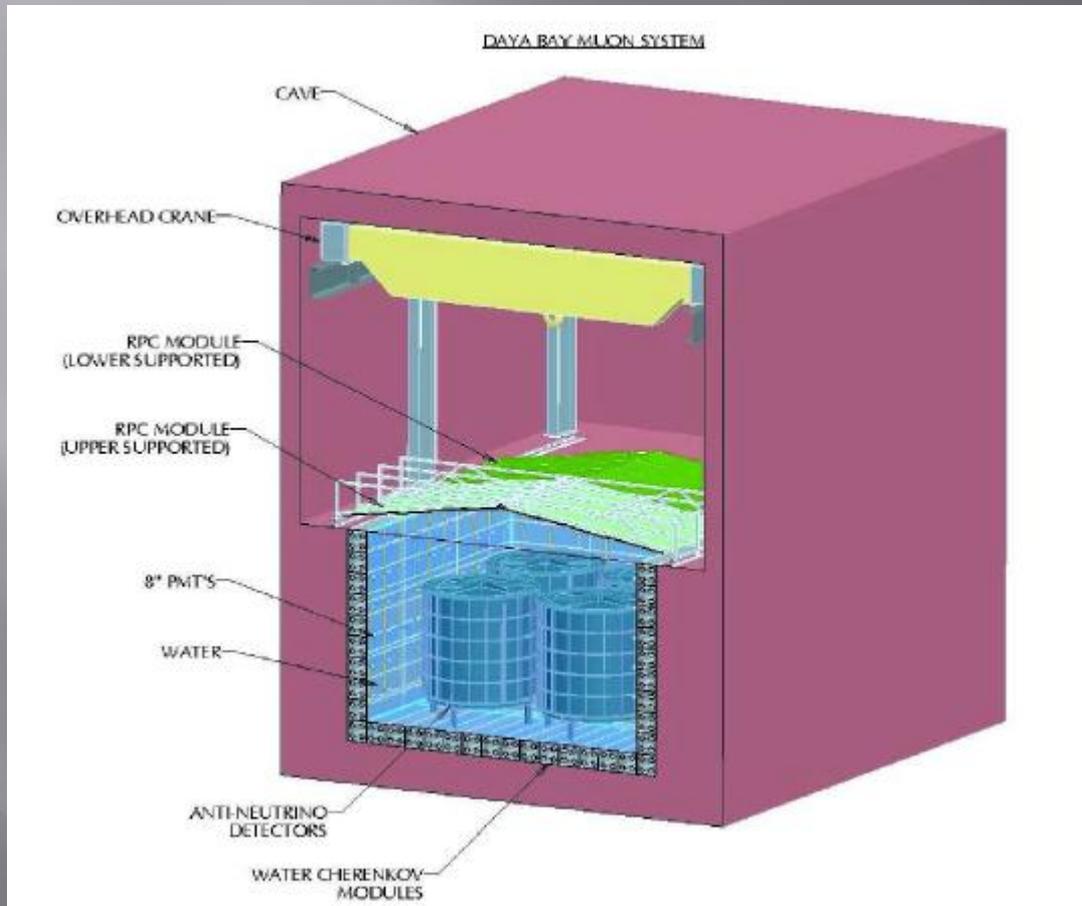
Детектор

target 160 см радиус,
320 см высота

45 см gamma-catcher

45 см buffer

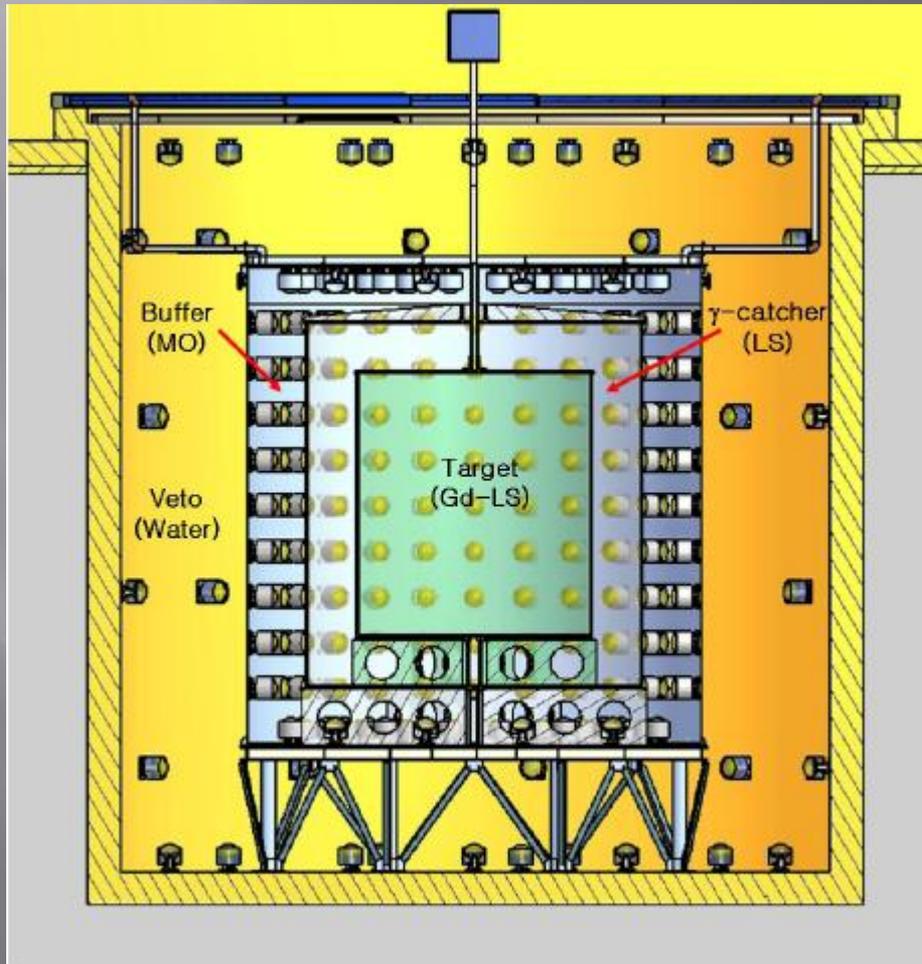
150 см толщина воды



RENO (Yongwang)



Детектор



target 140 см радиус,
320 см высота

60 см gamma-catcher

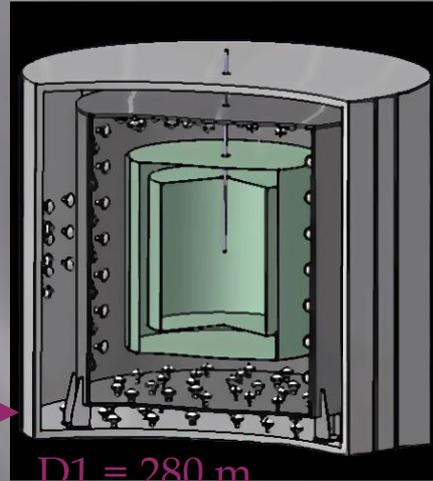
70 см buffer

150 см muon veto

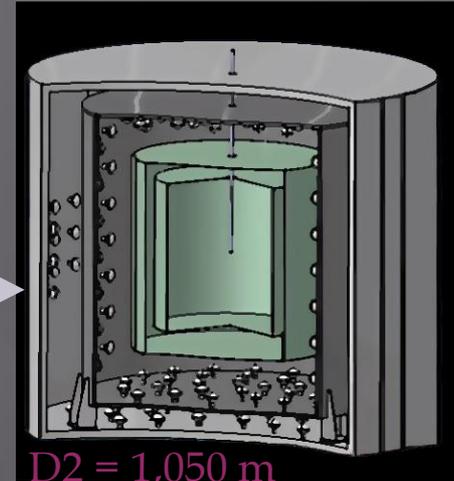
Double Chooz (France)



2 x 4.2 GWth
Chooz PWR power station



Near detector



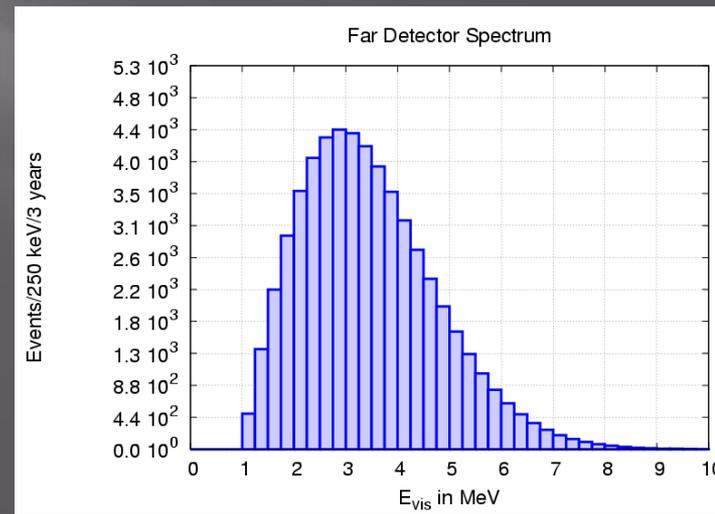
Far detector



- ✓ anti-νe flux (uranium 235, 238 & plutonium 239, 241)
- ✓ Reaction: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$, $\langle E \rangle \sim 4 \text{ MeV}$, $E_{\text{threshold}} = 1.8 \text{ MeV}$
- ✓ Disappearance experiment: search for a departure from the $1/D^2$ behavior and shape distortion

improve Chooz sensitivity $0.20 \rightarrow 0.03$

- ➔ Improve the detector concept
- ➔ and backgrounds rejection



Коллаборация Double Chooz

France



CEA/DAPNIA, Saclay
Collège de France/APC Paris
Subatech, Nantes

Russia



Institute for Nuclear Research RAS
Institute of Physical Chemistry RAS
RRC Kurchatov Institute

Germany



MPI Kernphysik, Heidelberg
Technische Universität, München
Universität Tübingen
Universität Hamburg
Universität Aachen

USA ?



University of Alabama
Argonne National Laboratory
Drexel University
Kansas State University
Lawrence Livermore National Laboratory
Louisiana State University
University of Notre Dame
University of Tennessee

Italy



LNCS

Spain

CIEMAT Madrid



Spokesman : H. de Kerret (APC)
Project manager : F. Ardellier (Saclay)

Атомная станция Choоз



Вход в
нейтринную
лабораторию

- ▣ Атомная станция Choоз В состоит из двух блоков ядерных реакторов 4200 МВт номинальной тепловой мощности. По типу реакторы относятся к PWR . Степень обогащения топлива по ^{235}U составляет 2-5%.
- ▣ Построена рядом со старой АЭС Choоз А, находящейся в горе.

Нейтринная лаборатория Choоз



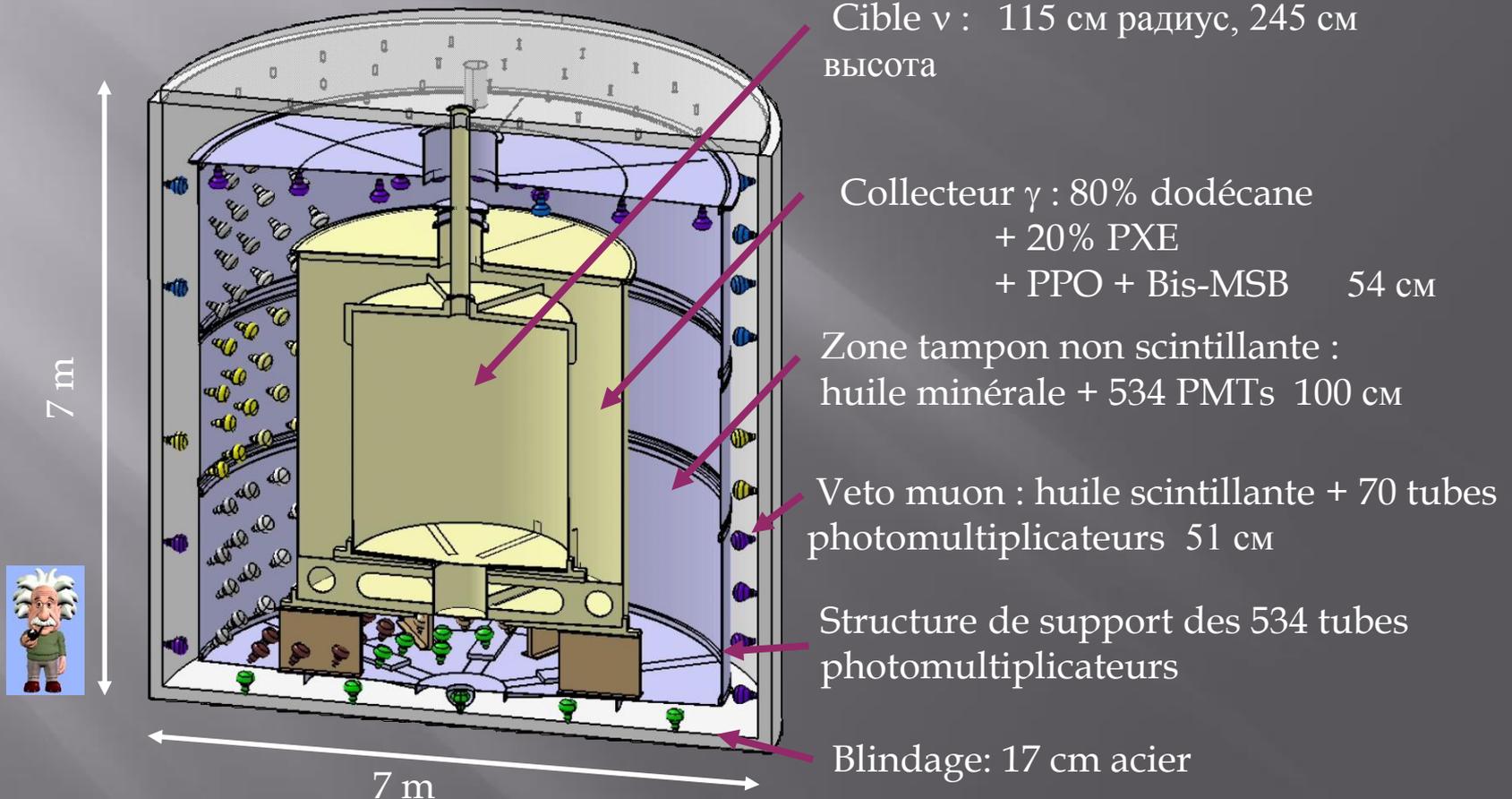
Вход в лабораторию



Вид тоннеля перед входом к детектору

Детектор

Erreurs systématiques $\left\{ \begin{array}{l} 2.8\% \text{ @ CHOOZ} \quad (2\% \text{ réacteur} + 1.5\% \text{ détecteur}) \\ 0.6\% \text{ @ Double Chooz} \quad (0\% \text{ réacteur} + 0.6\% \text{ détecteur}) \end{array} \right.$



@CHOOZ: $R = 1.01 \pm 2.8\%(\text{stat}) \pm 2.7\%(\text{syst})$

- Statistical error -

	CHOOZ	Double-Chooz
Target volume	5,55 m ³	10,32 m ³
Target composition	6,77 10 ²⁸ H/m ³	6,526 10 ²⁸ H/m ³
Data taking period	Few months	3-5 years
Event rate	2700	CHOOZ-far : 40 000/3 y CHOOZ-near: >1 10 ⁶ /3 y
Statistical error	2,8%	0,5%

Luminosity increases $L = \Delta t \times P(\text{GW}) \times N_p$

- Systematic error -

	Chooz	Double-Chooz
Reactor cross section	1.9 %	—
Number of protons	0.8 %	0.2 %
Detector efficiency	1.5 %	0.5 %
Reactor power	0.7 %	—
Energy per fission	0.6 %	—

Improve the detector concept

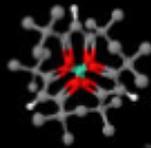
Two identical detectors → towards $\sigma_{\text{relative}} \sim 0,6\%$

Careful backgrounds control → error < 1%

СЦИНТИЛЛЯТОР

New DC Development:

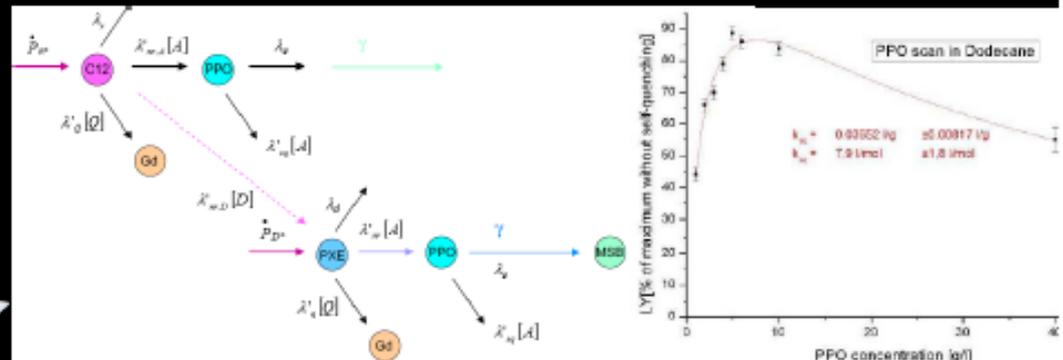
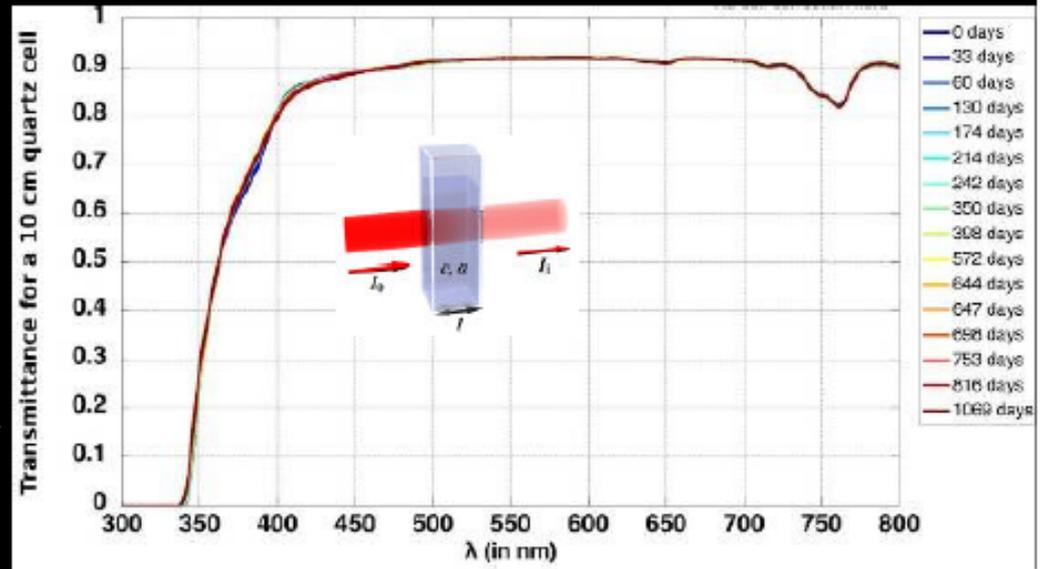
- Solvent: 20% PXE ($C_{16}H_{18}$) + 80% Dodecane ($C_{12}H_{24}$) + PPO/Bis-MSB
- 1 g/l $Gd(dpm)_3$: tris-(2,6-tetramethyl-3,5-heptanedione) Gd(III)



Features:

- Solubility (5 g/l)
- Attenuation length (full mixture) $>10m@430\text{ nm}$
- Good stability (rigid complex)
- Stability: tested for 3 y @20°C
- LY ~60%BC505
- Good for material compatibility (Ph neutral)
- Good Radiopurity (sublimation)
 - $^{226}\text{Ra}+^{235}\text{U}+^{228}\text{Ra}+^{228}\text{Th}+^{152}\text{Eu}$
 - $< 150\text{ mBq/detector}$
 - $^{40}\text{K} < 500\text{ mBq/detector}$

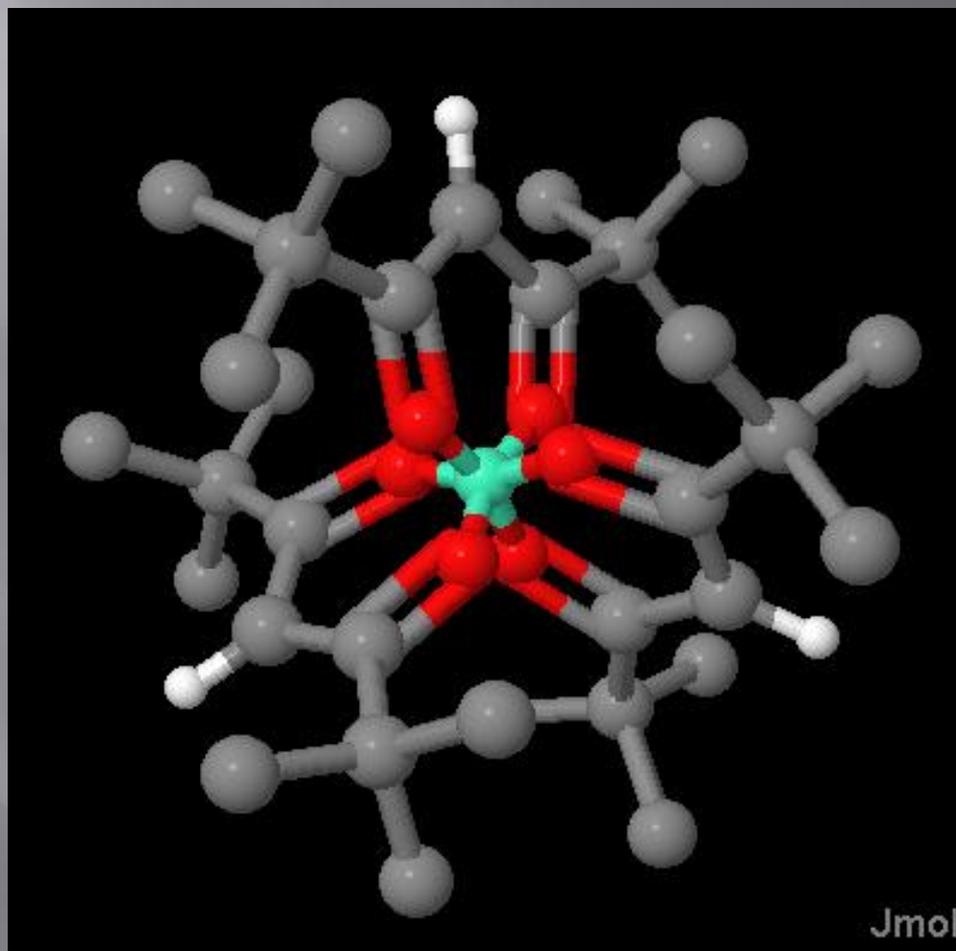
Theoretical understanding of the energy transfers (Confirmed by measurements)



T. Lasserre 26/05/2008

20

Структурная формула Gd комплекса



Gd-BDK at MPIK: tris-(2,6-tetramethyl-3,5-heptanedione) Gd(III)

The Gd Scintillators

CBX: pH controlled
single carboxylate
Gd-TMHA

BDK: beta-diketone
Gd-DPM

Chemical (Molecular) stability	labile	rigid
Solubility (common org.)	high (50 g/l)	medium (5 g/l)
Absorbance Length	good (>25 m, 440nm)	good (>25m, 440nm)
Light Yield	high (80%BC505)	medium(60%BC505)
Compatibility (reactivity)	medium (pH 4)	good (pH neutral)
Radiopurity	avg: liquid chemistry	good: gas chemistry

Gd-BDK C. Buck, F. X. Hartmann, D. Motta, S.Schoenert, U. Schwan, " Metal Beta-diketone Scintillators", Presentation at the Workshop on Future Low Energy Neutrino Experiments", Technical University Munich, Munich 9-11 October 2003.

Gd-TMHA F. X. Hartmann, Low Level Scintillators and Gadolinium", ibid (Munich) and "Scintillator Development for a θ_{13} Reactor Experiment in Europe (Double Chooz), Third Workshop on Future Low Energy Neutrino Experiments, Niigata, March (2004) 20-22.



Inner Det. Liquid Production

- **A SINGLE Batch LS for both detectors**
- Target Solvent: 20% PXE – 80% Dodecane
- GC Solvent: 4 % PXE – 46% Dod. - 50% Oil
- 100 Kg Gd compound delivered
- PVDF coated Target Transport Tank (6m³)
- Buffer Oil Ordered



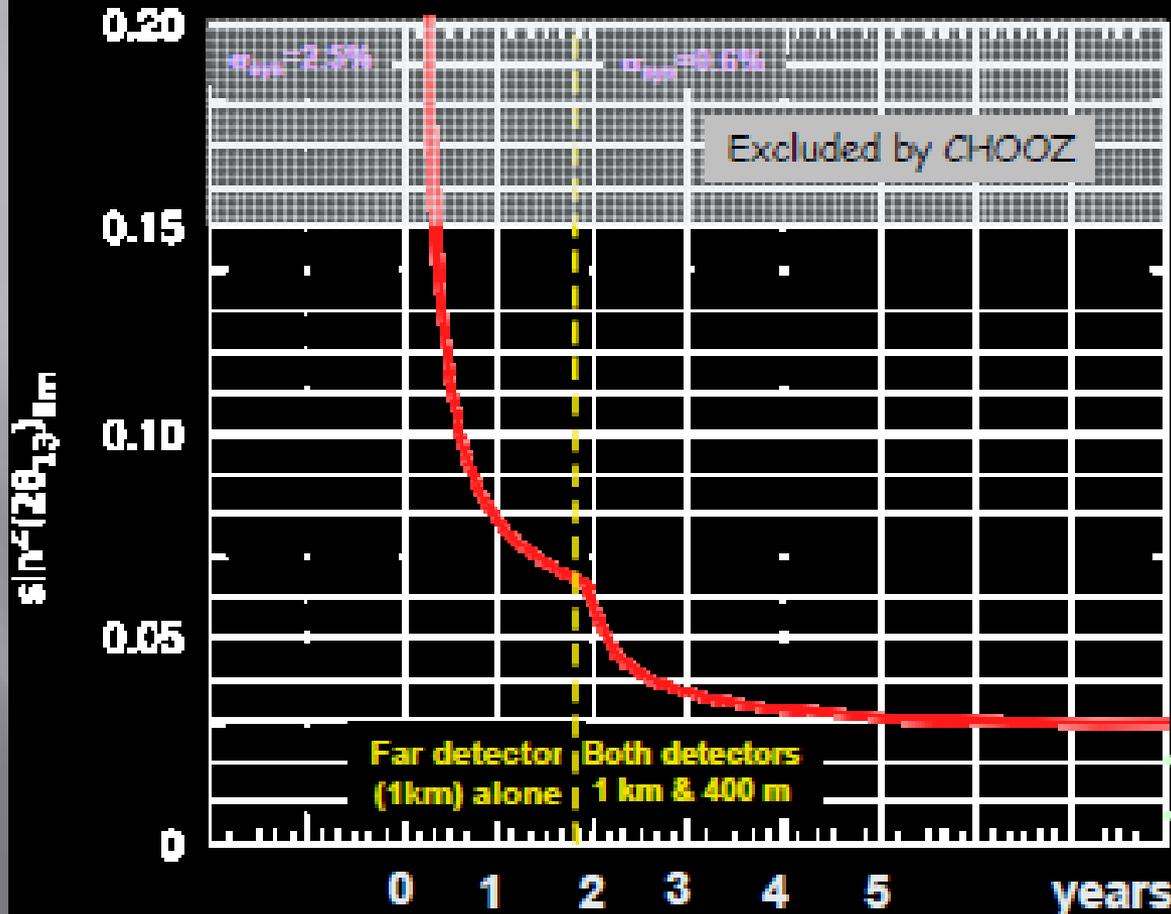
MPIK new building for LS storage, mixing and purification



3 iso-tanks ready for transportation, storage & filling

Ожидаемые результаты

$\Delta m^2_{\text{atm}} = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ (20% uncertainty)



- Efficiencies included
- 1% 'bin-bin' uncorrelated error on background subtraction.
- Systematics 1Det = CHOOZ
- Systematics 2Det:
 - $\sigma_{\text{abs}} = 2.0\%$
 - $\sigma_{\text{rel}} = 0.6\%$
 - $\sigma_{\text{sc1}} = 0.5\%$
 - $\sigma_{\text{shp}} = 2.0\%$
 - $\sigma_{\Delta m^2} = 20\%$

Complementary With T2K

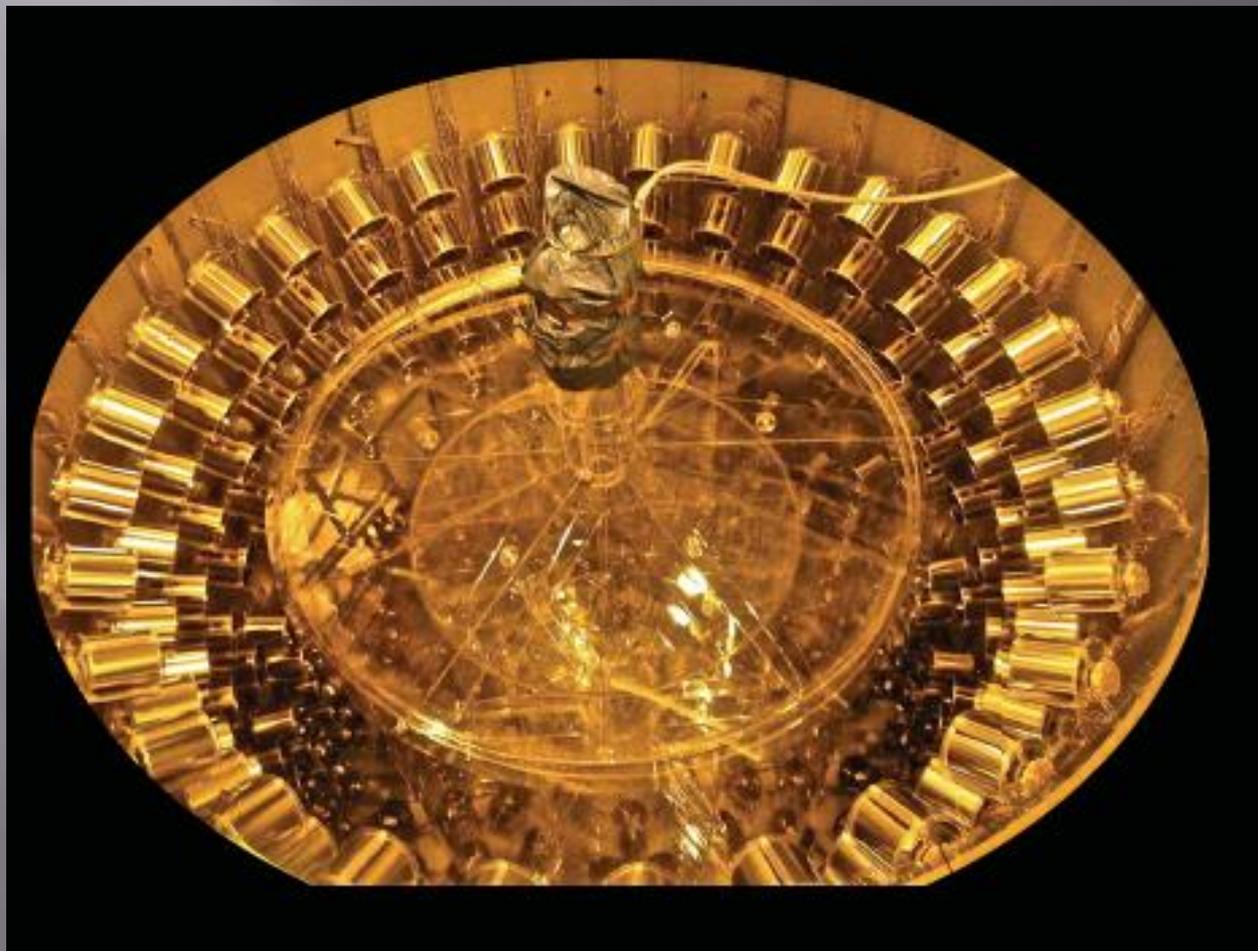
Статус

- ▣ Закончен монтаж дальнего детектора
- ▣ Подготовлены все жидкости для заливки в детектор и доставлены на АЭС
- ▣ Установлена и проверена вся система сбора информации
- ▣ В октябре началось заполнение детектора
- ▣ В декабре-январе ожидается физический пуск
- ▣ Параллельно ведутся работы по строительству лаборатории ближнего детектора

Холл с детектором



Вид детектора внутри





Помещение для хранения сцинтиллятора у входа в лабораторию



емкости для хранения сцинтиллятора 33 м³ каждая.

Система заливки сцинтиллятора в помещении хранения



Тоннель со стороны входа в
лабораторию

Мониторинг детектора в подземной лаборатории

Hideki Watanabe – координатор работ на рабочем месте у сервера, контролирующего параметры детектора ($t^{\circ}\text{C}$, P газа и уровни жидкости).

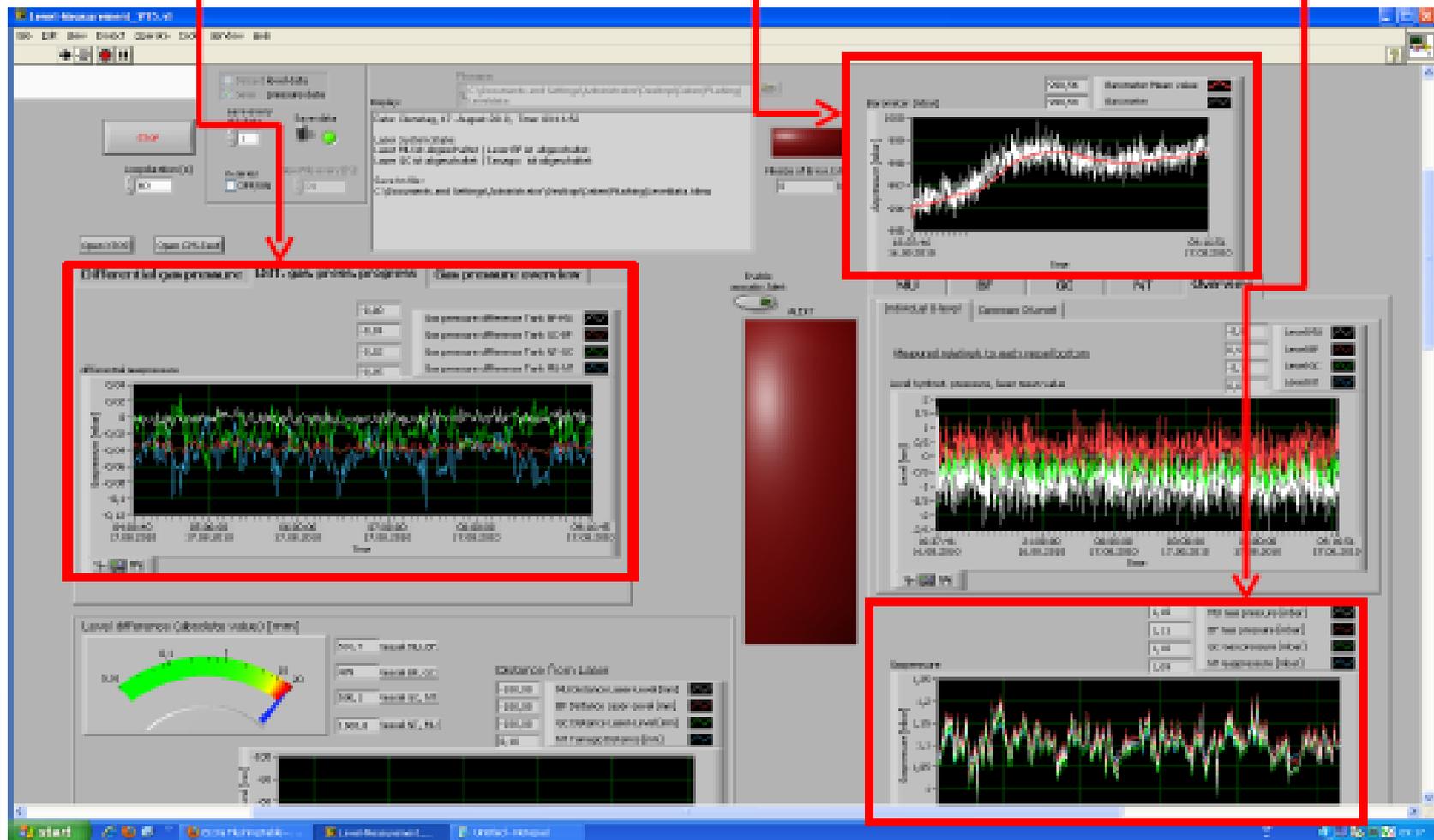


Schematics of Pressure Monitoring Panel

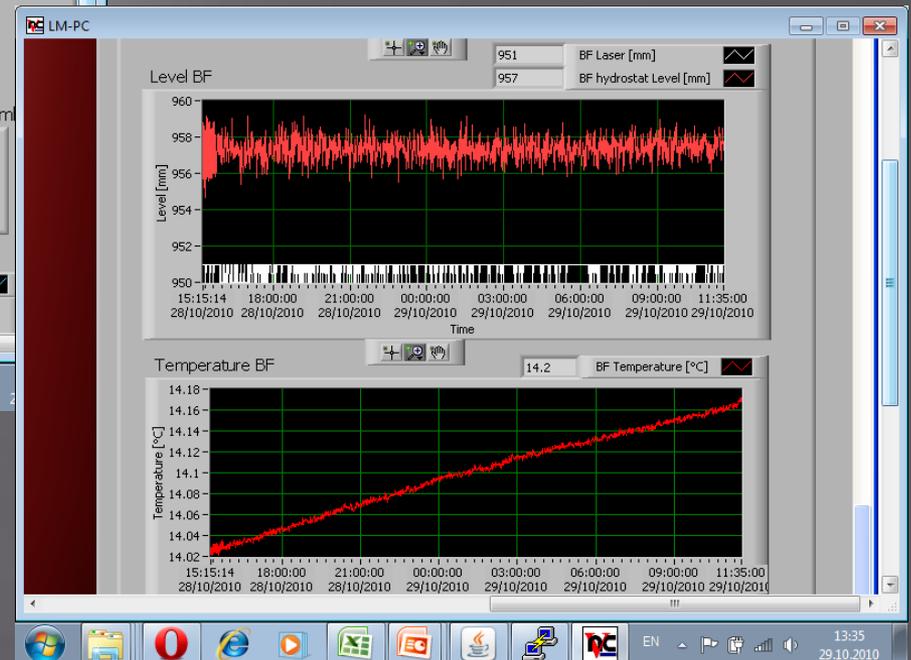
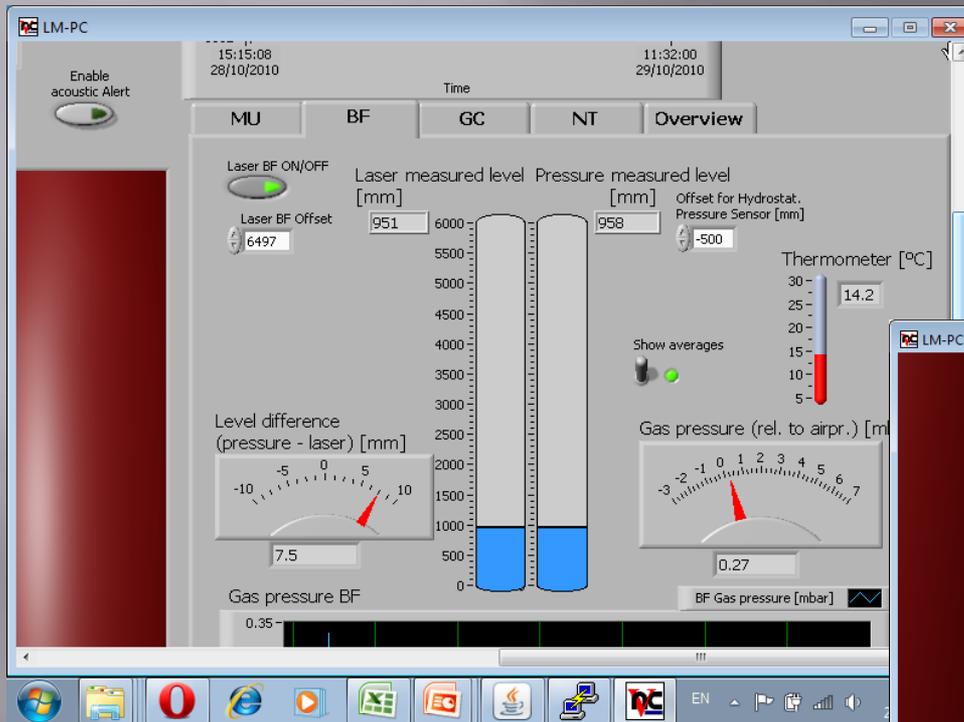
(II) Differential Pressures for Each Adjacent Vessel

(III) Atmospheric Pressure

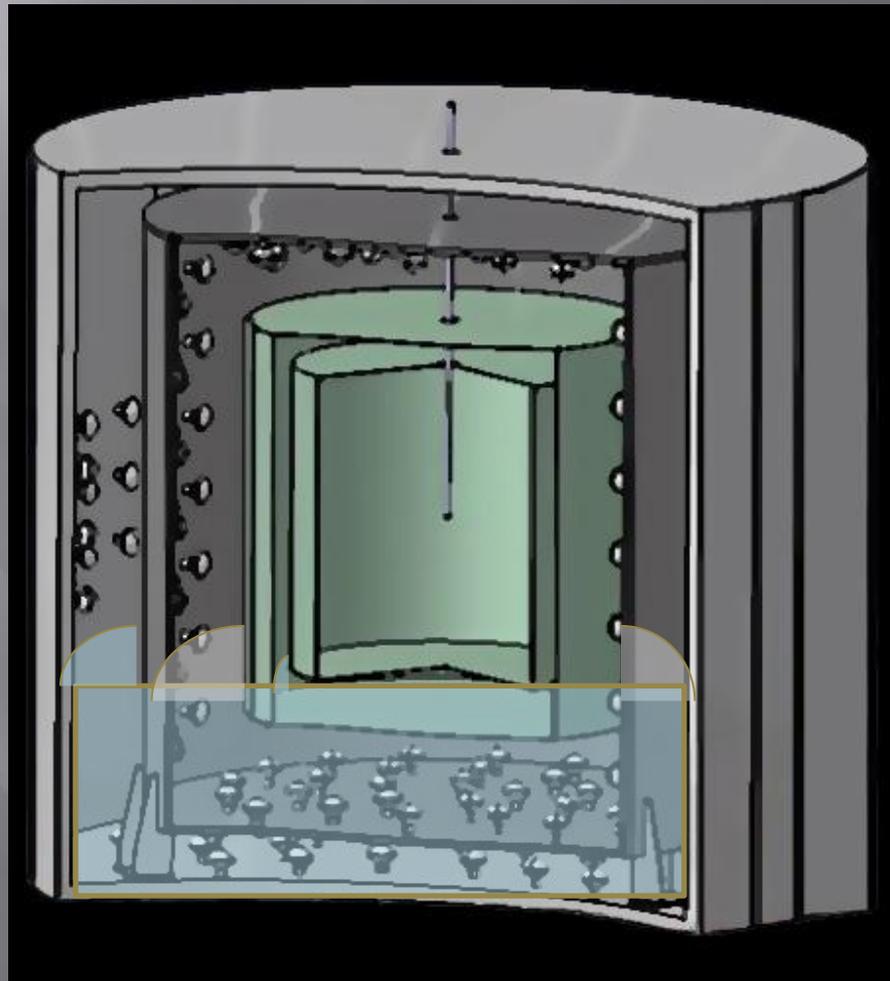
(I) Absolute Pressures for Each Vessel



Уровень жидкости в ВФ и ее температура



Уровень жидкостей в детекторе



Заключение

Детектор должен быть готов пуску в начале следующего года. После его ввода в действие должен будет состояться коллаборационный meeting в Бразилии
Ждем первых результатов в 2011 году.

Спасибо за внимание