

Эксперимент с реакторными нейтрино по поиску угла смешивания Θ_{13}

В.В. Синев

Институт Ядерных Исследований РАН

План

- ▣ Открытие нейтринных осцилляций
- ▣ Проекты по измерению θ_{13}
- ▣ Атомная станция Chooz B во Франции и нейтринная лаборатория
- ▣ Детектор
- ▣ Ожидаемые результаты
- ▣ Статус

Открытие нейтринных осцилляций в потоках солнечных и атмосферных нейтрино

- Нехватка нейтрино в потоке от Солнца (Homestake, Kamiokande, GALLEX/GNO+SAGE, Super-Kamiokande, SNO, BOREXINO)
- Подтверждение с реакторными антинейтрино (KamLAND)
- Исчезновение нейтрино в потоке атмосферных нейтрино (Kamiokande, IMB, Super-Kamiokande, MACRO, Soudan-2)
- Подтверждение с ускорительными нейтрино (MINOS, K2K, T2K)

$$\Delta m^2_{\text{sol}} = 7.59 \times 10^{-5} \text{ эВ}^2,$$
$$\sin^2 2\theta_{\text{sol}} = 0.87$$

PDG 2010

$$\Delta m^2_{\text{atm}} = 2.43 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2,$$
$$\sin^2 2\theta_{\text{atm}} = 1.0$$

Феноменология осцилляций

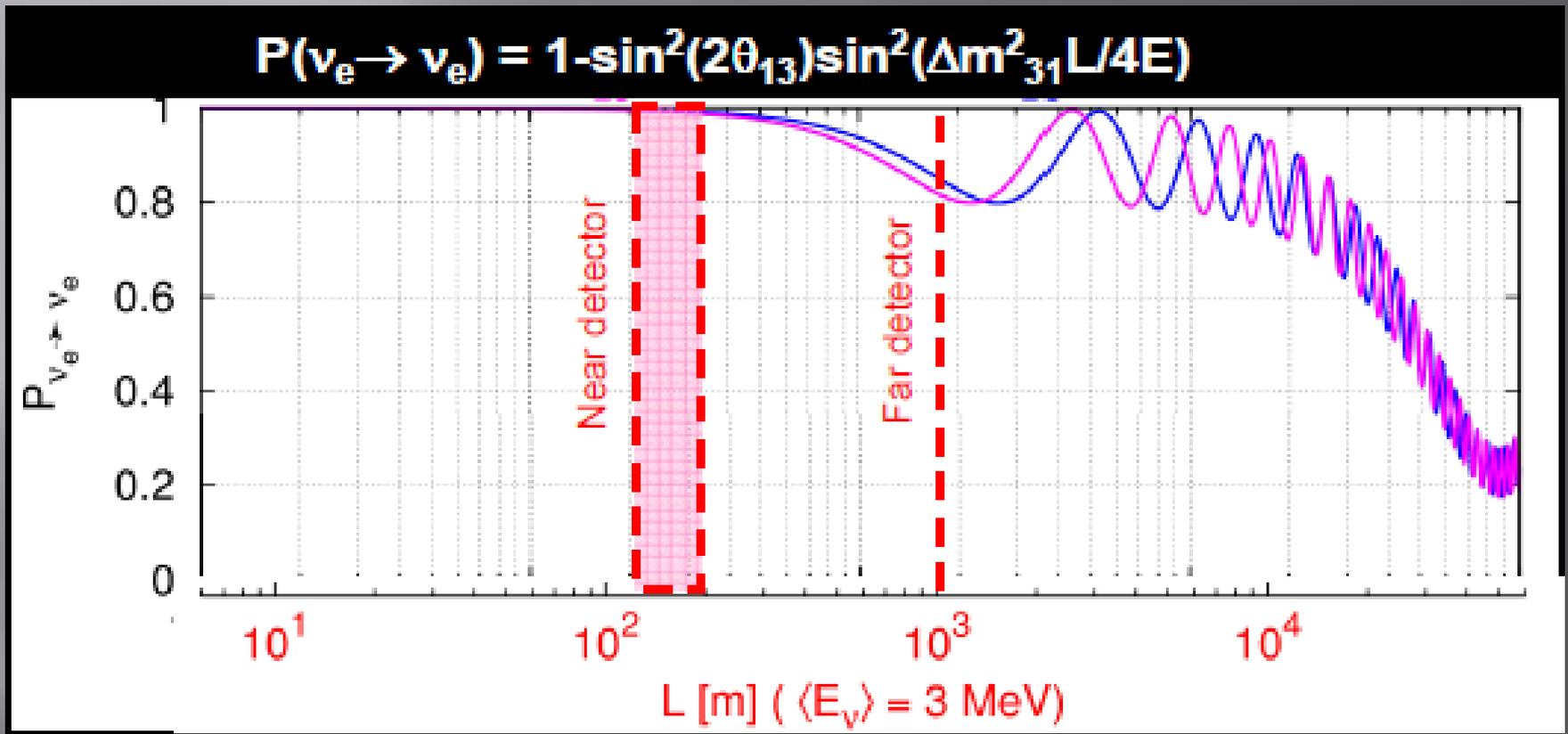
- ▣ Типы нейтрино: ν_e, ν_μ, ν_τ $N = 3$ (2,9840 0,0082, PDG 2010)
- ▣ Массовые состояния: ν_1, ν_2, ν_3
- ▣ Смешивание: $|\nu_k\rangle = \sum U_{ki} |\nu_i\rangle$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{1e} & U_{2e} & U_{3e} \\ U_{1\mu} & U_{2\mu} & U_{3\mu} \\ U_{1\tau} & U_{2\tau} & U_{3\tau} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \Delta_{13} - \frac{1}{2} \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \Delta_{21} - \text{etc}, \quad \Delta_{ij} = \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E}$$

$$P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \Delta_{13}$$

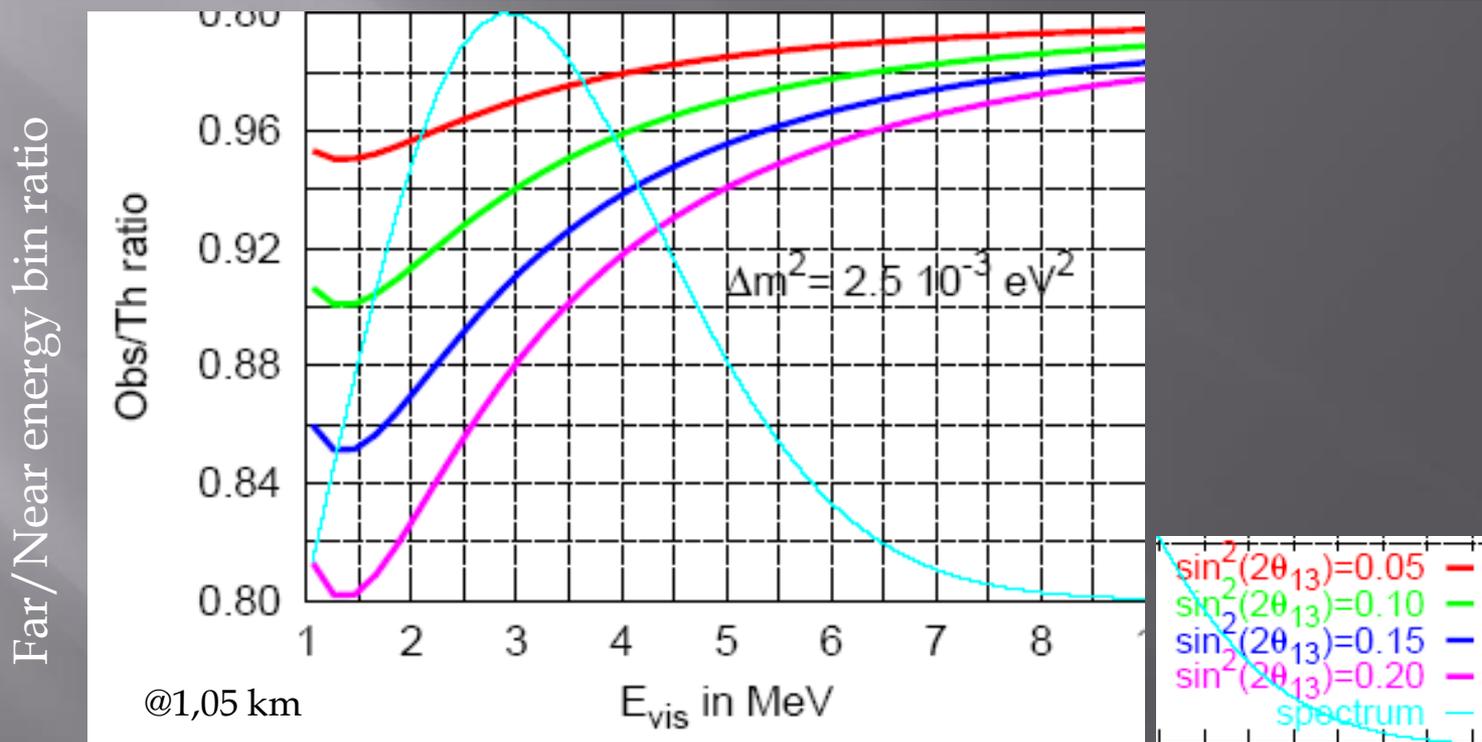
Вероятность нейтрино сохранить свой аромат



Пример ν осцилляций на реакторе

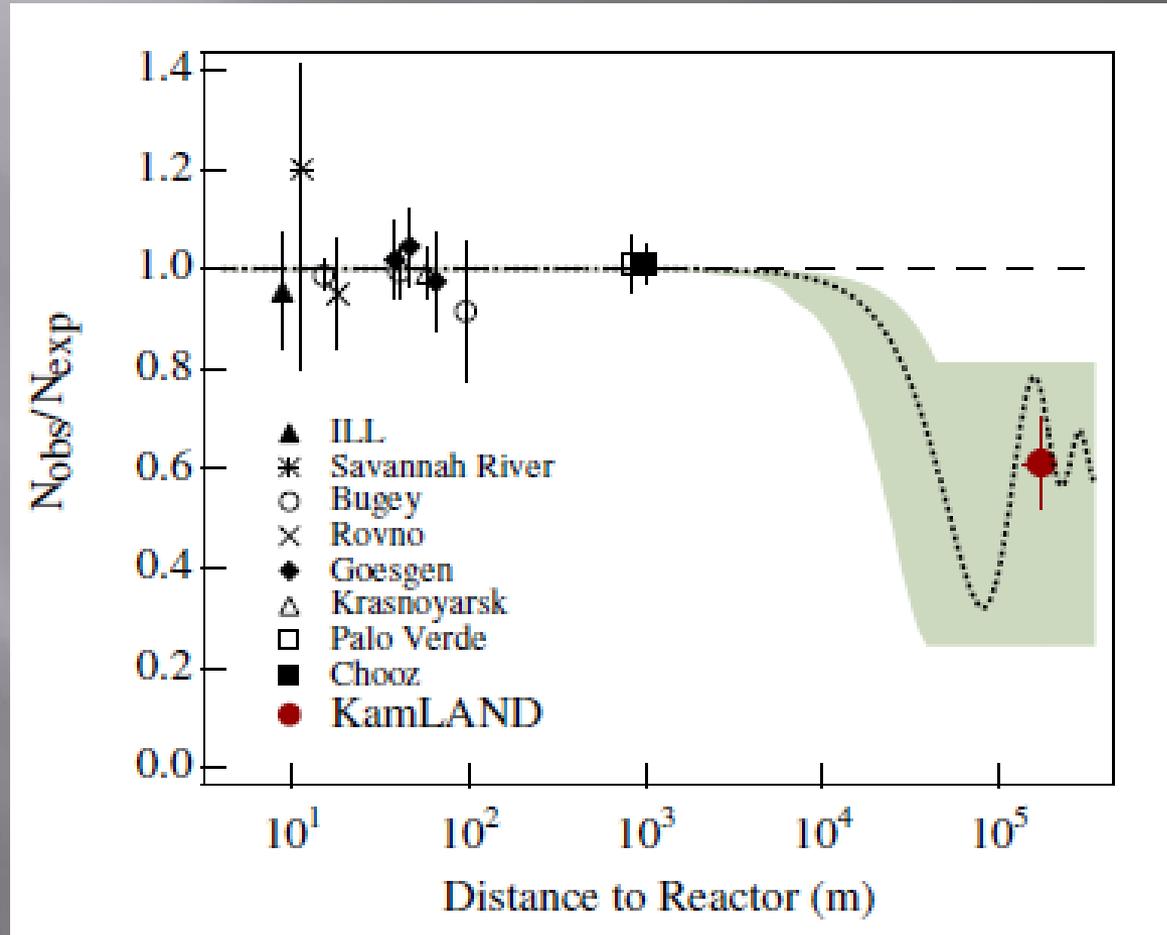
(Double CHOOZ configuration)

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

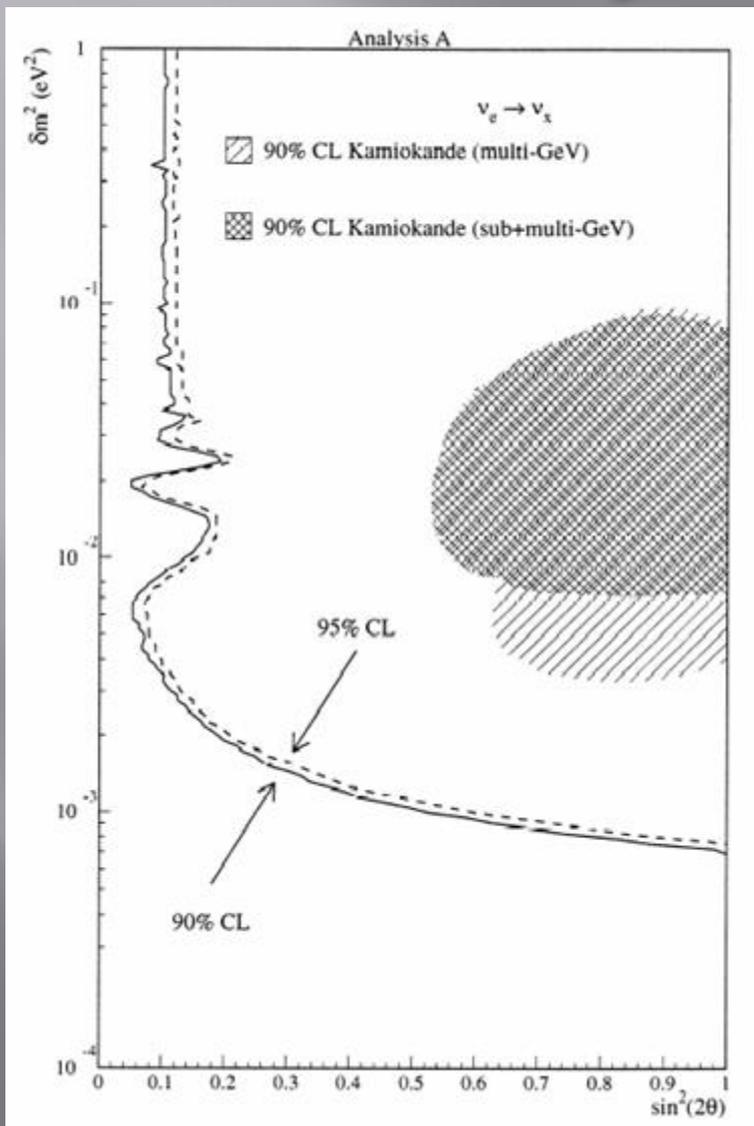


@1,05 km

Состояние в экспериментах на реакторах перед Double Chooz

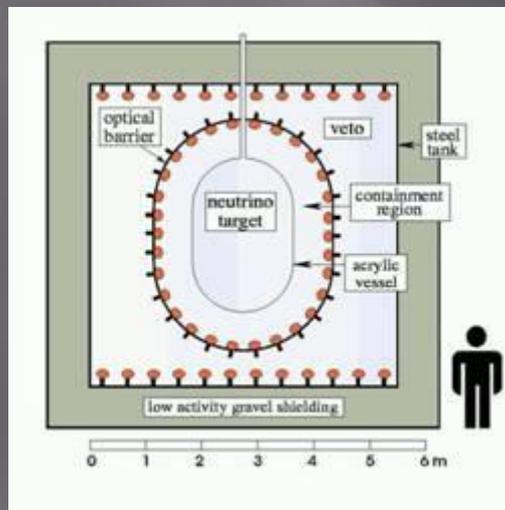


Результат CHOOZ



$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ (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

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. Chouhey³⁸ J. Conrad¹⁵
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-Neff²² M. Goodman⁵ F. Gray⁸
C. Grieb²² J.J. Grudzinski²⁵ V.J. Guarino³
F. Hartmann²² C. Hagner²⁰ K.M. Heeger⁵
W. Hofmann²² G. Horton-Smith⁹ P. Huber²²
L. Inzhechik¹⁹ J. Jochum²³ H. Jostlein³⁴ R. Kadel¹⁵
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. Lachenmaier²²
T. Lasserre²⁹ C. Laughton¹⁴ C. Lendvai²² J. Li¹⁷
M. Lindner²² J. Link¹³ M. Longo²⁰ Y.S. Lu¹⁷
K.B. Luk^{5,8} Y.Q. Ma¹⁷ V.P. Martemyanov¹⁹
C. Mauger⁹ H. Menghetti⁶ R. McKeown⁹
G. Mention¹⁵ J.P. Meyer²⁹ L. Mikaelyan¹⁹
H. Minakata²⁷ D. Naples²⁷ H. Nunokawa¹¹
L. Oberauer²² M. Obolensky¹⁵ S. Parke¹⁴
S.T. Petcov^{20,28} O.L.G. Peres³⁰ W. Potzel²³
J. Pilcher¹² R. Plunkett¹⁴ G. Raffelt²² P. Rapidis¹⁴
D. Reyna³ B. Roe²² M. Roññec²² Y. Sakamoto²⁸

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

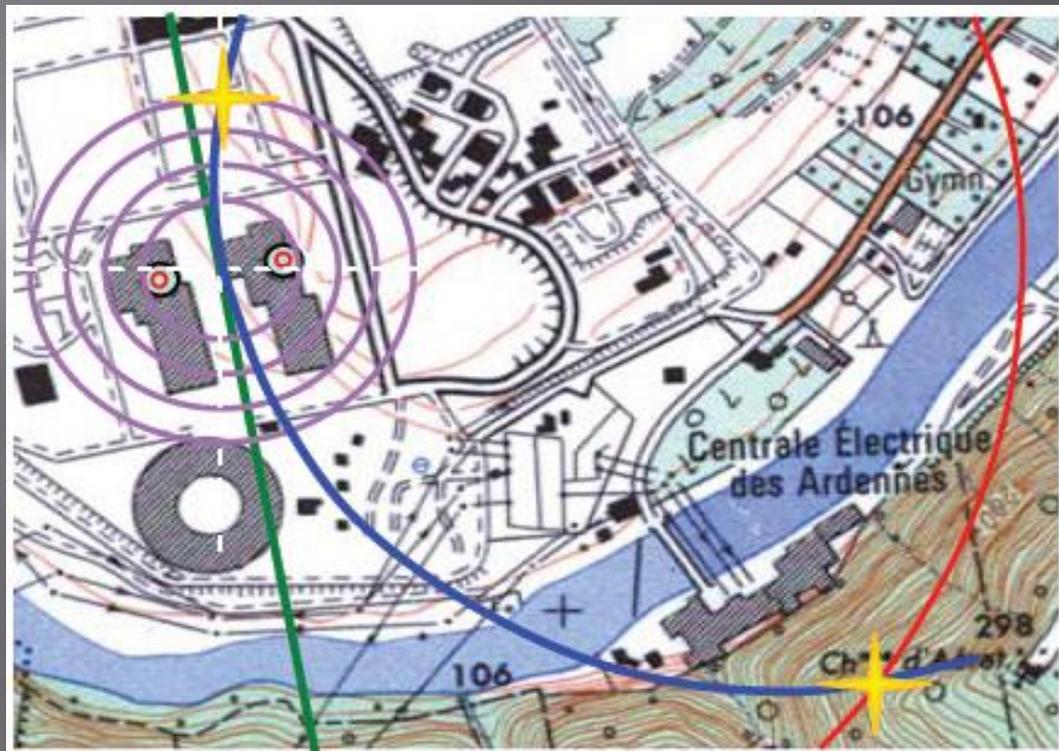
F. Ardellier¹⁹ I. Barabanov¹⁰ J. C. Barrière¹⁹ F. Beißel¹
S. Berridge²³ L. Bezrukov¹⁰ A. Bernstein¹⁴ T. Bolton¹²
N.S. Bowden²⁰ Ch. Buck¹⁶ B. Bugg²³ J. Busenitz² A. Cabrera⁴
E. Caden⁶ C. Cattadori^{7,17} S. Cazaux¹⁹ M. Cerrada⁵ B. Chevis²³
H. Cohn²³ J. Coleman¹⁵ S. Cormon²¹ B. Courty⁴ A. Cucoanes¹
M. 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. Huber²² J. Jochum²⁴ Y. Kamyshev²²
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. Motta¹⁹ 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)



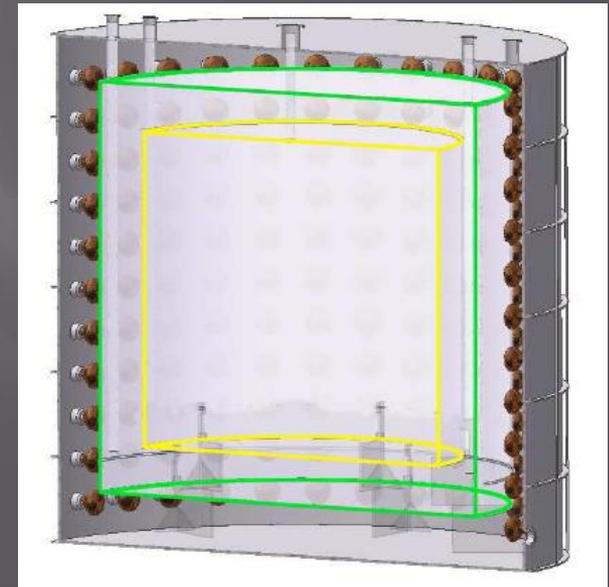
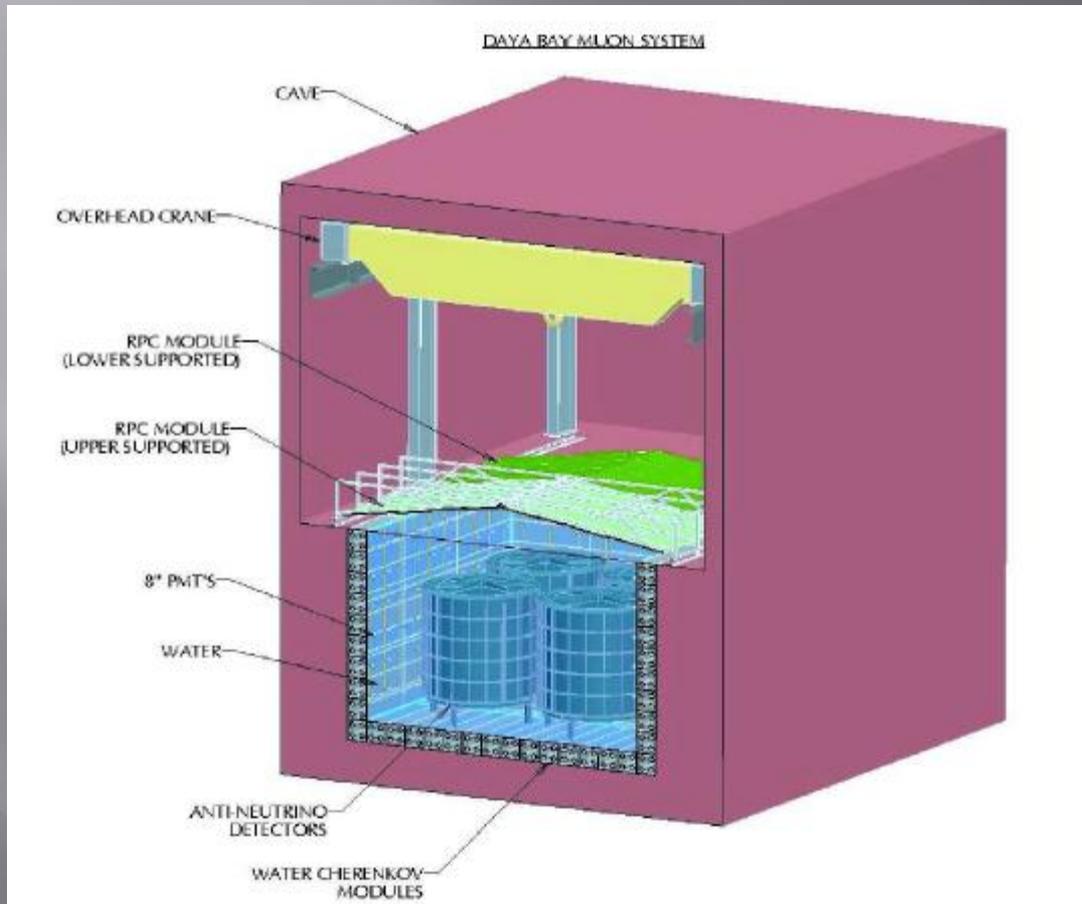
Детектор

target 160 см радиус,
320 см высота

45 см gamma-catcher

45 см buffer

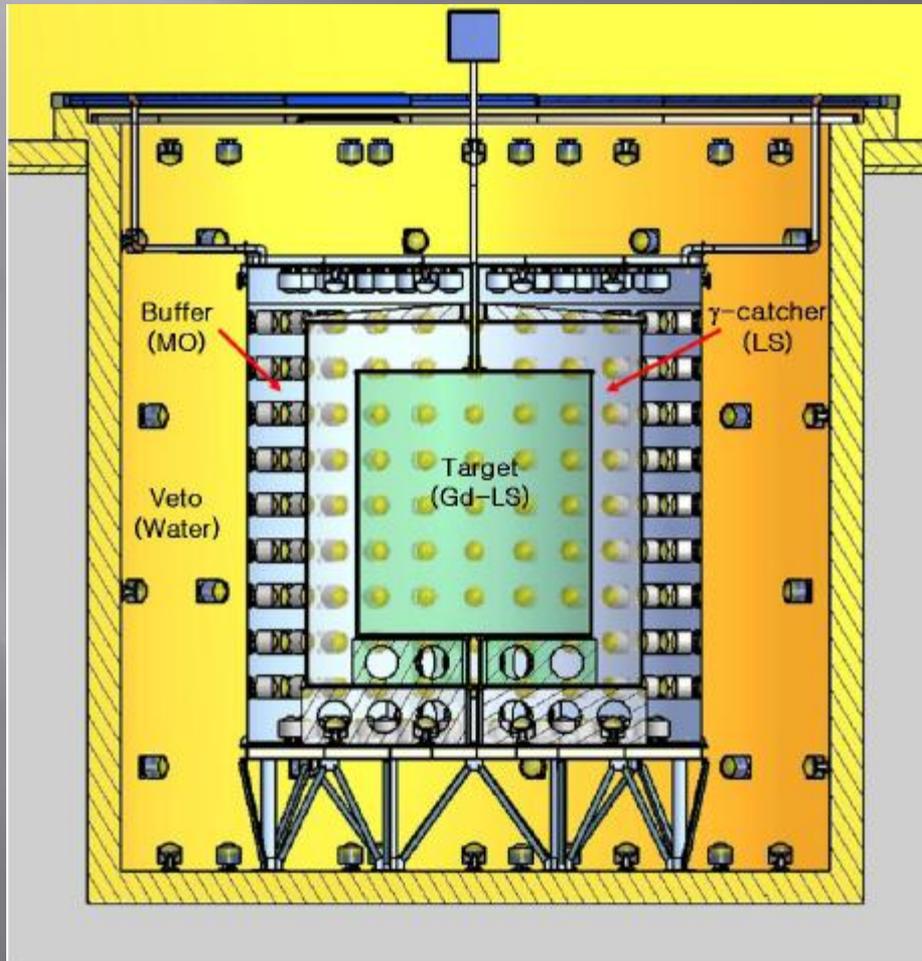
150 см толщина воды



RENO (Yongwang)



Детектор



target 140 см радиус,
320 см высота

60 см gamma-catcher

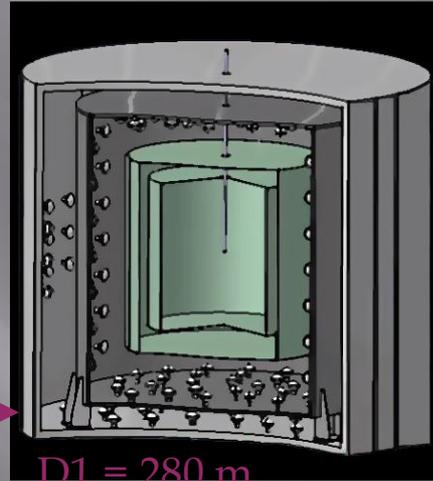
70 см buffer

150 см muon veto

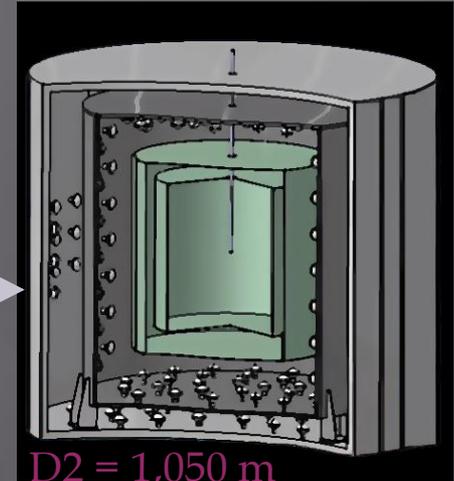
Double Chooz (France)



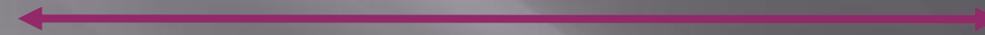
2 x 4.2 GWth
Chooz PWR power station



Near detector



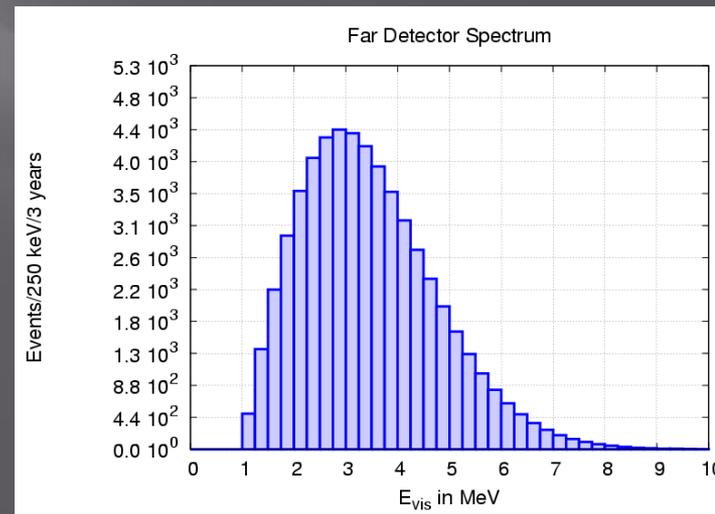
Far detector



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

improve Chooz sensitivity 0.20 \rightarrow 0.03

- \rightarrow Improve the detector concept
- \rightarrow and backgrounds rejection



Double Chooz collaboration



Spokesman: Hervé de Kerret (APC)



France: APC Paris, CEA/Dapnia Saclay, Subatech Nantes, Strasbourg



Germany: Aachen, MPIK Heidelberg, TU München, ECU Tübingen, Hamburg



Spain: CIEMAT Madrid



UK: Univ. Sussex



Japan: HIT, Kobe, MUE, Niigata, TGU, TIT, TMU, Tohoku



Russia: RAS, RRC Kurchatov Institute



USA: Alabama, ANL, Chicago, Columbia, Drexel, Illinois, Kansas, LLNL, LSU, Notre Dame, Sandia, Tennessee, UCD



Brazil: CBPF, UNICAMP



Атомная станция Choоз В



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



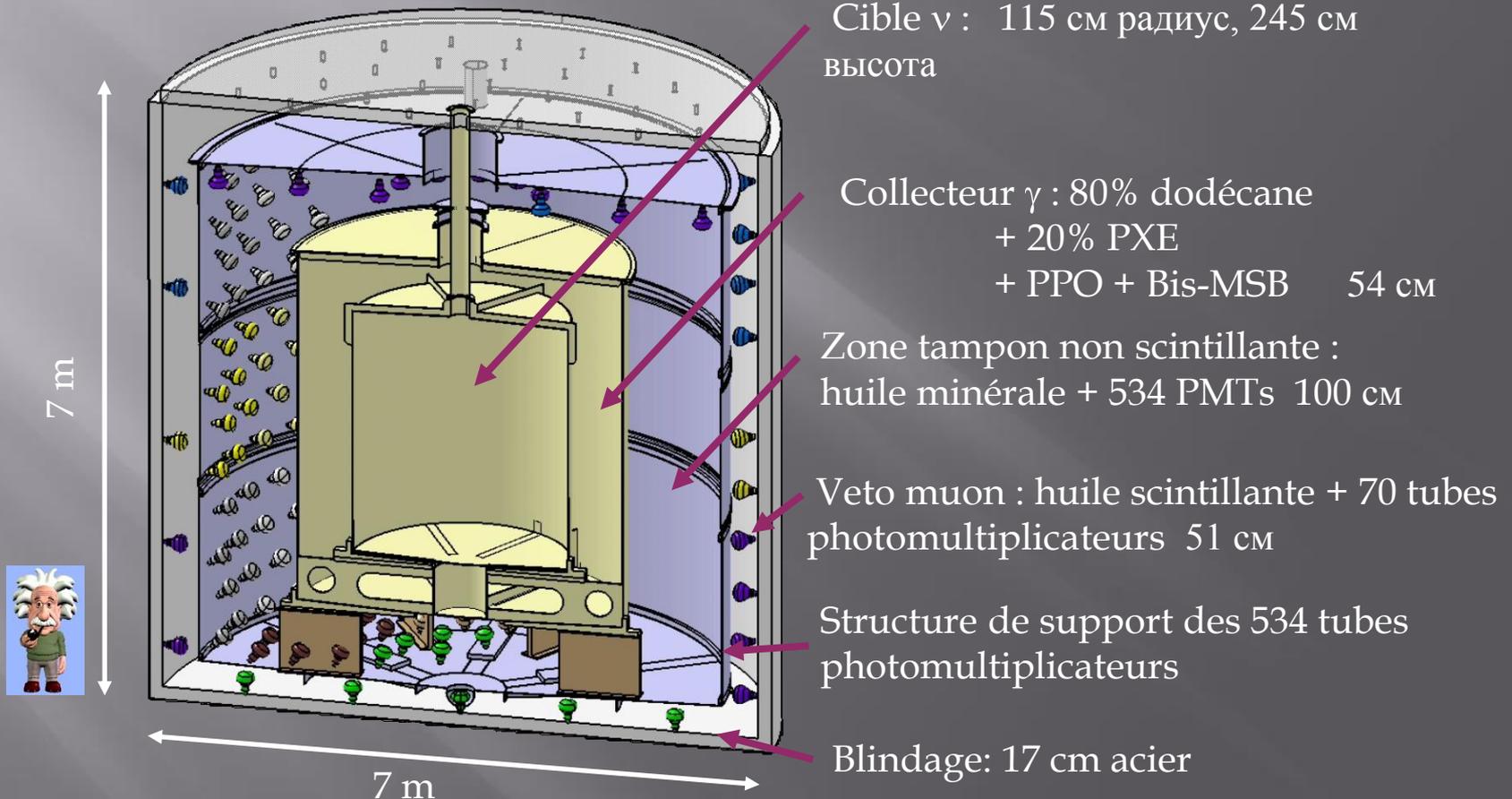
Вход в лабораторию



Вид тоннеля перед входом к детектору

Детектор

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



Улучшения по сравнению с первым экспериментом CHOOZ

@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

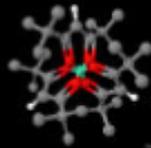
Two identical detectors → towards σ relative ~0,6%

Careful backgrounds control → error < 1%

СЦИНТИЛЛЯТОР

New DC Development:

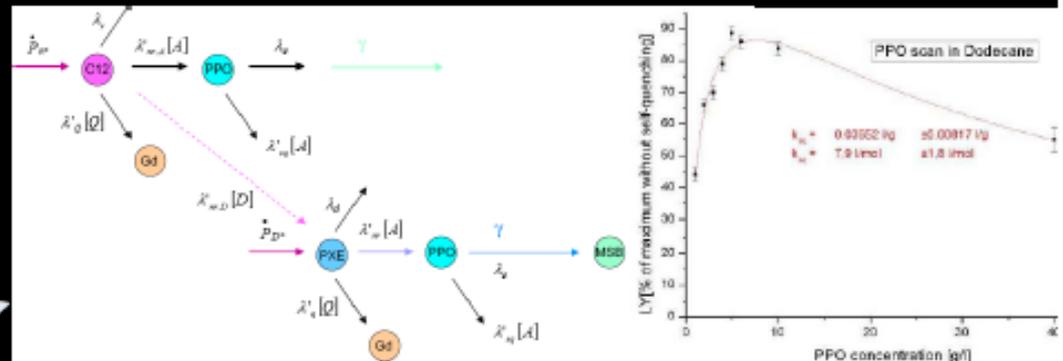
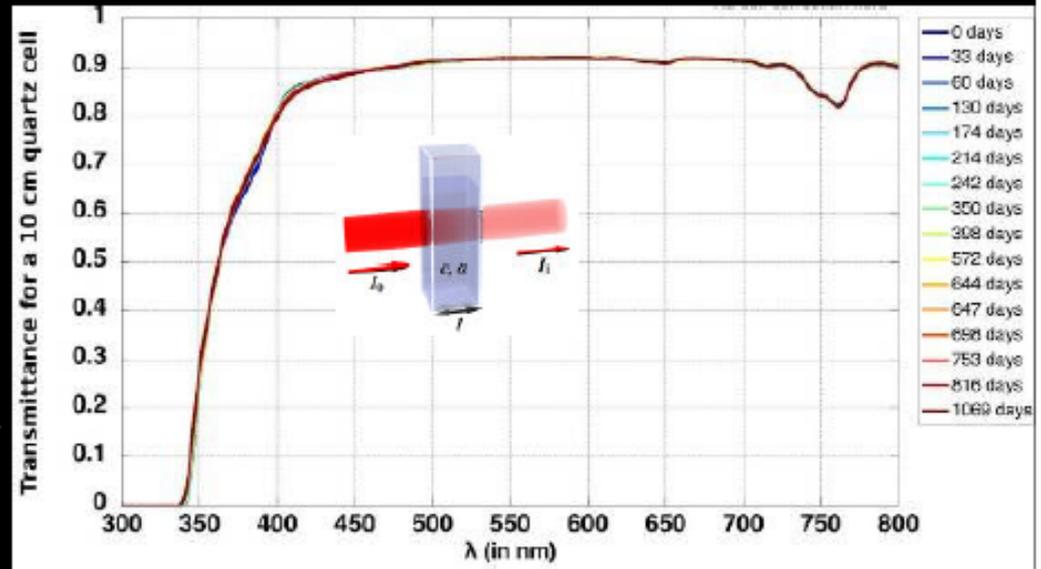
- Solvent: 20% PXE ($C_{16}H_{18}$) + 80% Dodecane ($C_{12}H_{24}$) + PPO/Bis-MSB
- 1 g/l $Gd(dpm)_3$: tris-(2,6-tetramethyl-3,5-heptanedione) Gd(III)



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)
 - $^{226}Ra+^{235}U+^{228}Ra+^{228}Th+^{152}Eu$
 - $< 150\text{ mBq/detector}$
 - $^{40}K < 500\text{ mBq/detector}$

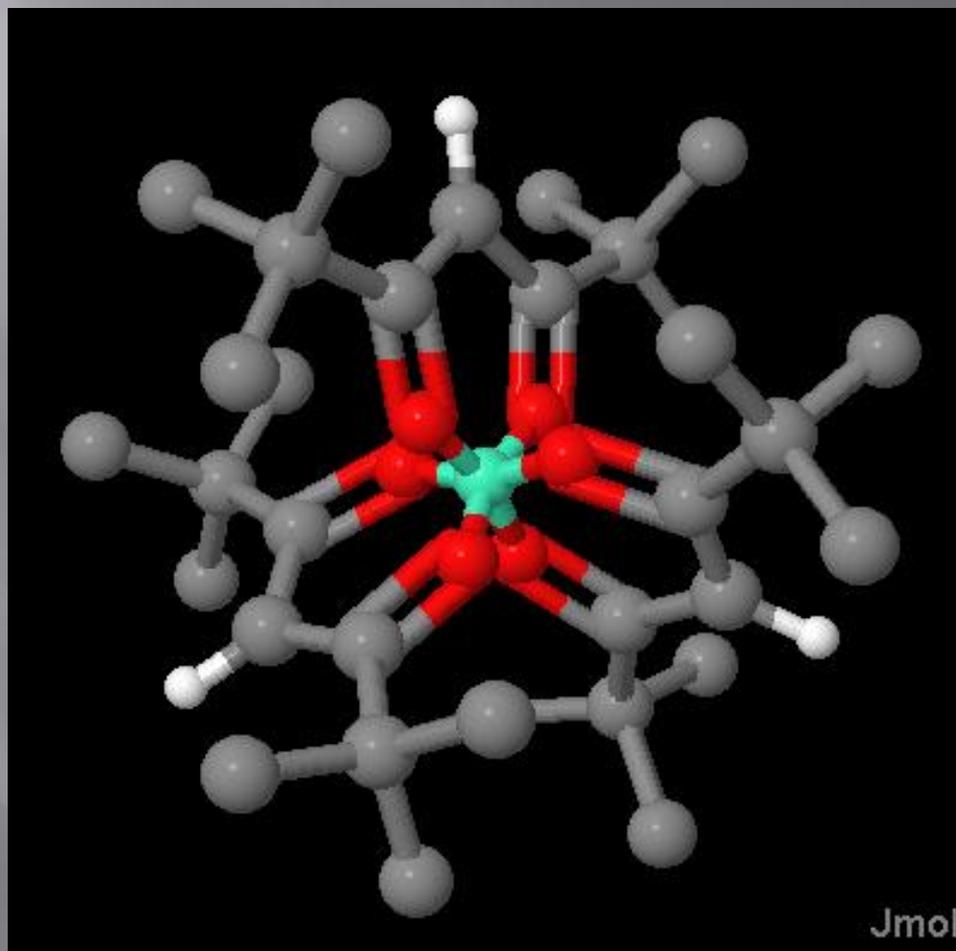
Theoretical understanding of the energy transfers (Confirmed by measurements)



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

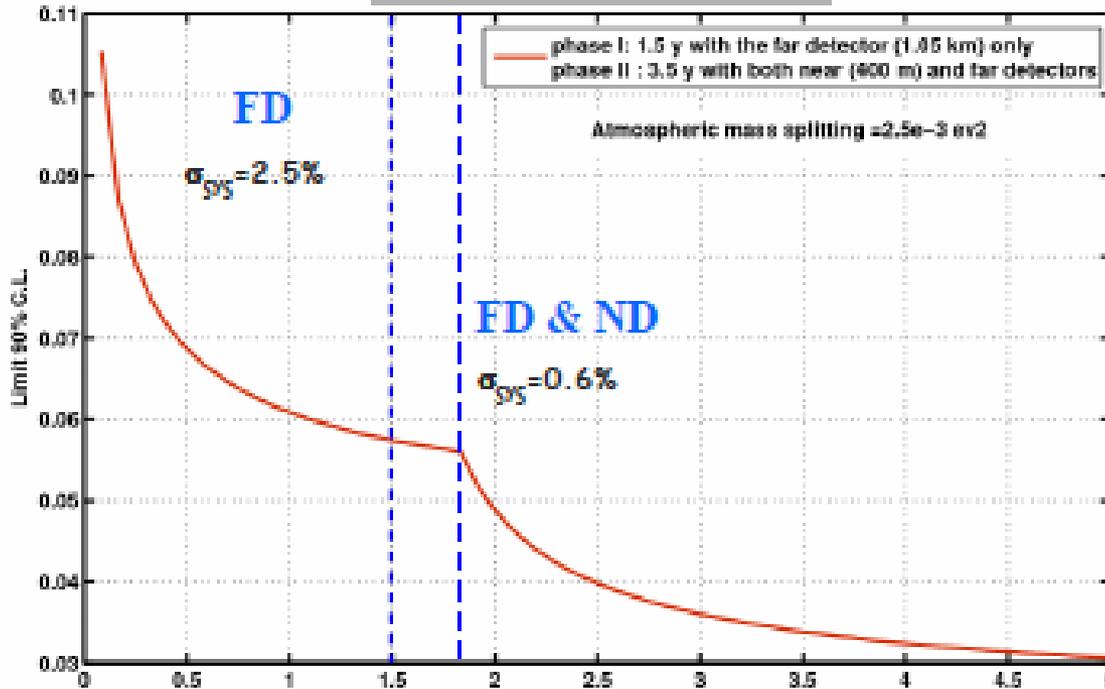


3 iso-tanks ready for transportation, storage & filling



Ожидаемая чувствительность

Expected θ_{13} limit



2 phases expected

- Far detector only:
10 x CHOOZ statistics
 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.06$
- Far + near detectors:
shape analysis
 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.03$

Время после начала эксперимента в годах

Double-Chooz can surpass the original CHOOZ result in 3 months (even with a single detector) ³¹

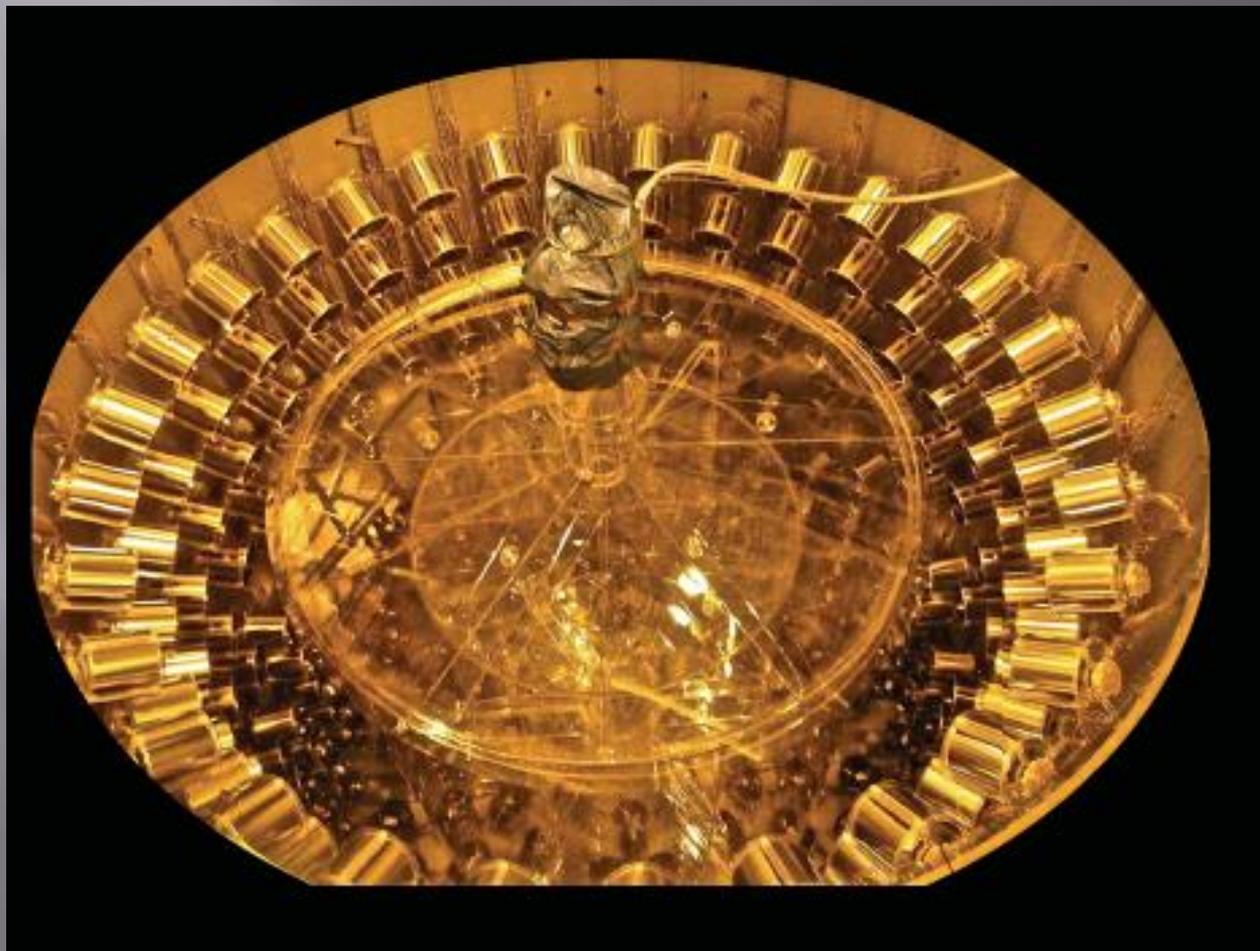
Статус

- ▣ В декабре 2010 детектор был заполнен всеми жидкостями (мишень: 10 т – ЖС(Gd), поглотитель гамма-квантов: 20 т – ЖС, буфер и световод: 110 т – парафиновое масло, внутреннее veto: 90 т - ЖС)
- ▣ С февраля 2011 начались измерения.
- ▣ Начаты работы по строительству лаборатории ближнего детектора

Холл с детектором



Вид детектора внутри



Спасибо за внимание