

*Эксперименты по поиску  
стерильного нейтрино  
в мире,  
в России,  
в ПИЯФ,  
и на СМ-3*

*А.П. Серебров*

*Эксперимент ПИЯФ*  
**NEUTRINO-4**  
*на ВВР-М и на СМ-3*

*Участники работы,  
внесшие вклад на различных её этапах  
от развития предложения до разработки новой  
и ранее изготовленной аппаратуры*

**ПИЯФ**

**А.П.Серебров, В.Г. Зиновьев, А.К.Фомин, В.А.Соловей, А.С.Чёрный,  
Э.М.Малютенков, Ю.Е.Логинов, М.С.Онегин, А.К.Гагарский, Г.А.Петров,  
С.П.Орлов, В.В.Марченков, Т. Савельева, И.А.Митропольский,  
О.М.Жеребцов, Л.А.Попеко, Л. Григорьева, В.Ивочкин, С.И.Калинин,  
Е.Н.Леонова, И.В.Шока, О.П.Федорова, О.Е.Шугаева, Е.П.Волков,  
Н.А.Николаев, Р.М.Самойлов, Н.Е.Антонов**

**Курчатовский институт**

**В.П.Мартемьянов, В.Л.Циноев, В.Г.Тарасенко, А.И.Алёшин,  
А.Сабельников**

**НИИАР**

**М.Н.Святкин, А.Л.Петелин, С.А.Сазонтов, Д.К.Рязанов, М.О.Громов,  
Н.С.Храмков.**

**ИФВЭ**

**В.И.Рыкалин**

# *Четыре типа фундаментальных взаимодействий*

- *Сильные взаимодействия* - формирование ядер
- *Электромагнитные взаимодействия* - формирование атомов, молекул, вещества
- *Слабые взаимодействия* – распады и превращения элементарных частиц
- *Гравитационные взаимодействия* – формирование Вселенной

*Однако есть Тёмная Материя и Тёмная Энергия,  
а значит есть ещё новый или новые типы  
взаимодействий*

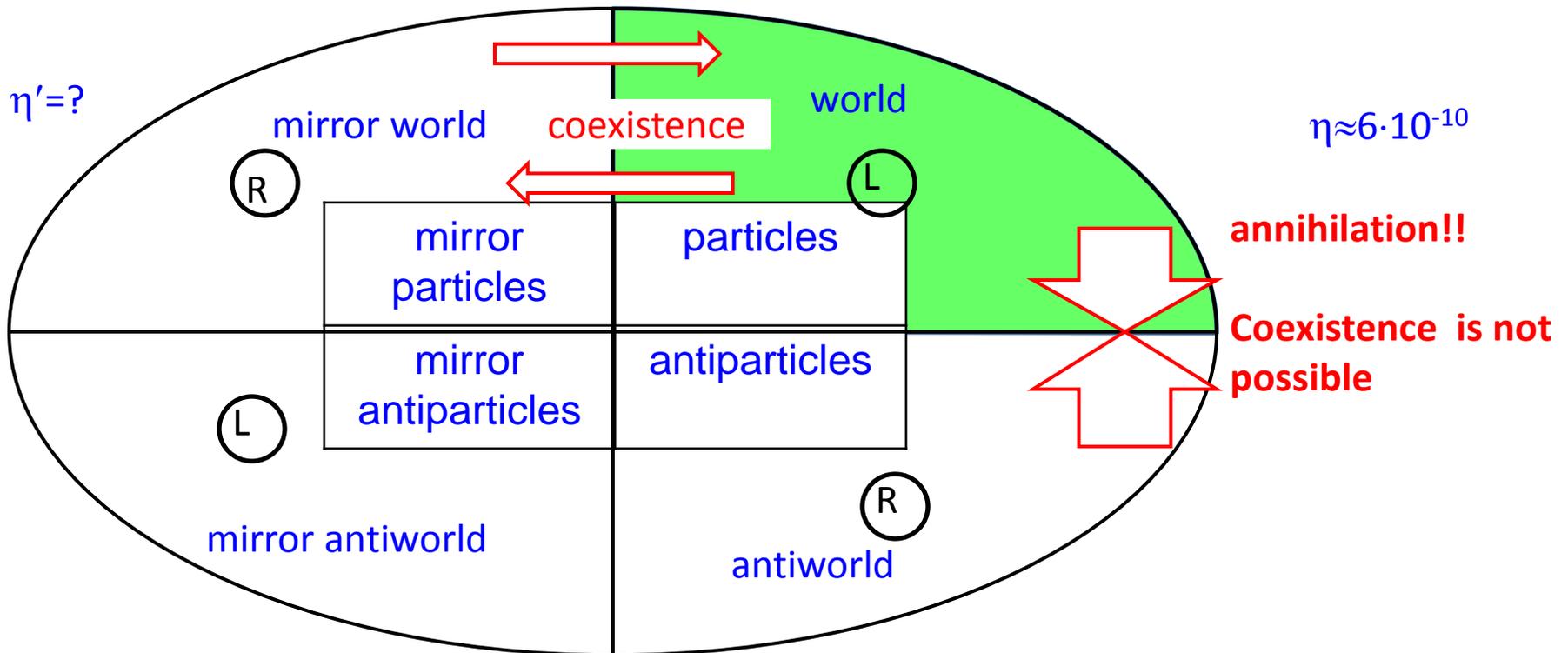
*Есть прогресс со времён Птолемея (127 -145 г.г.),  
но мы понимаем только 5% Вселенной .*

*Мы прошли очень много, но приблизились очень мало.*



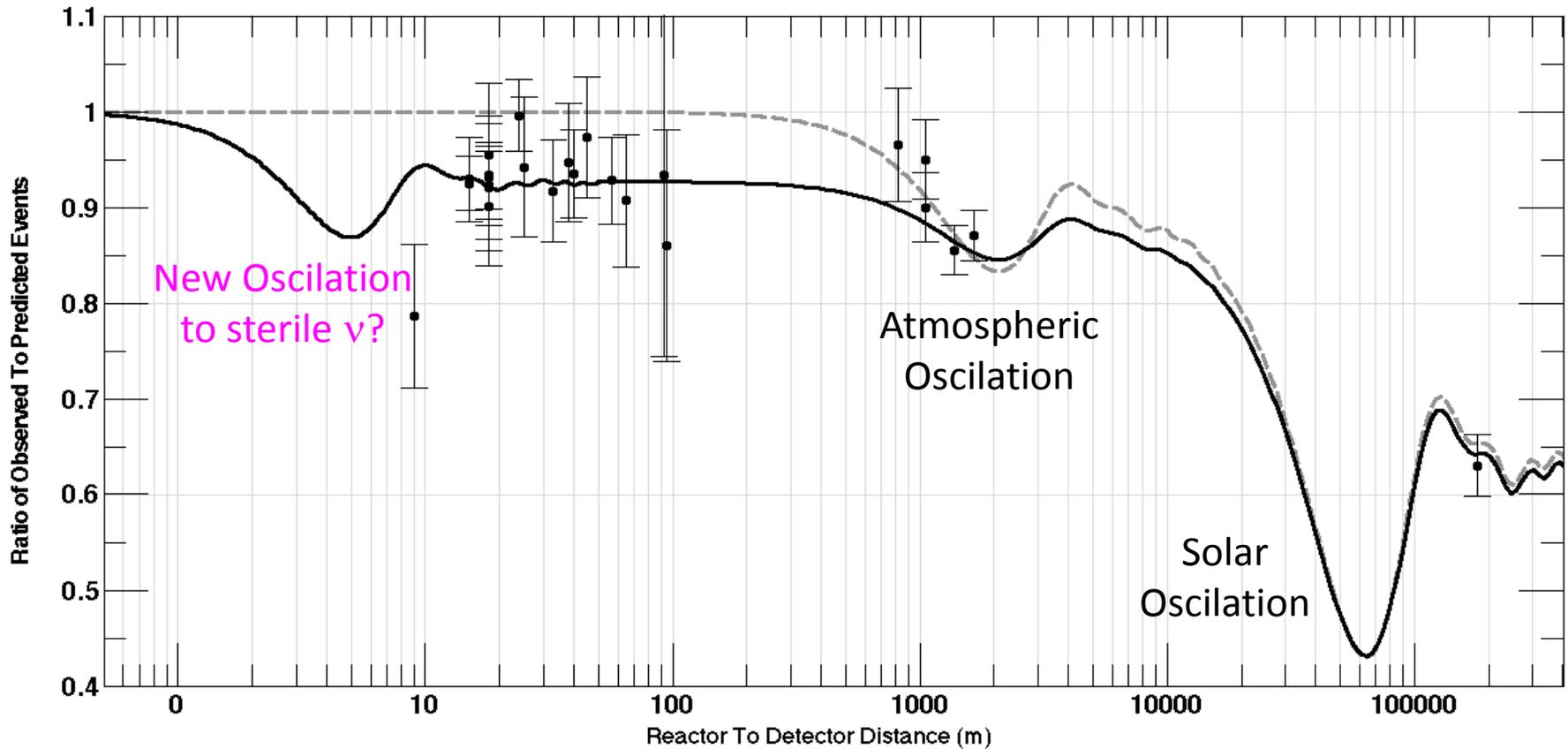
# Асимметрия нашего мира

Coexistence is possible, transitions are complicated



# Reactor Anomaly

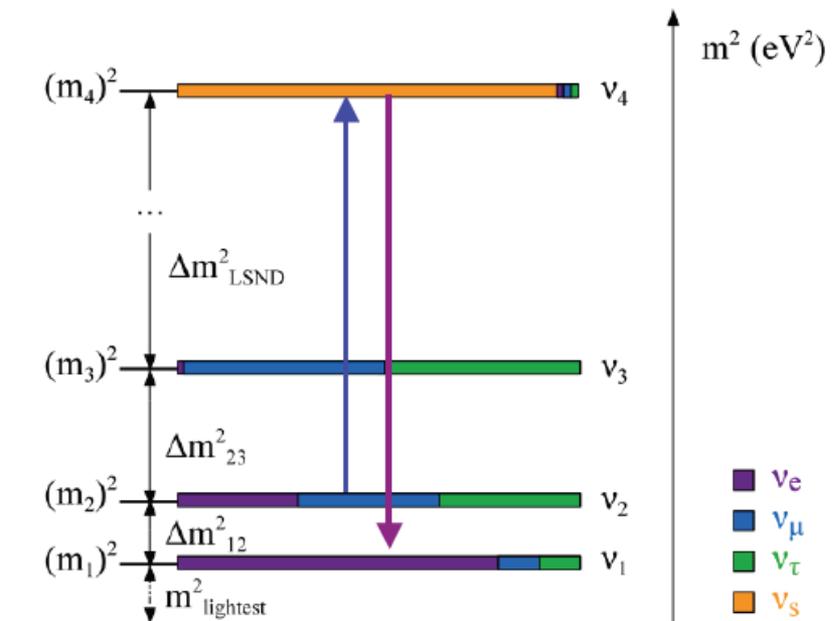
*G. Mention et al., Phys. Rev. D83, 073006, 2011*



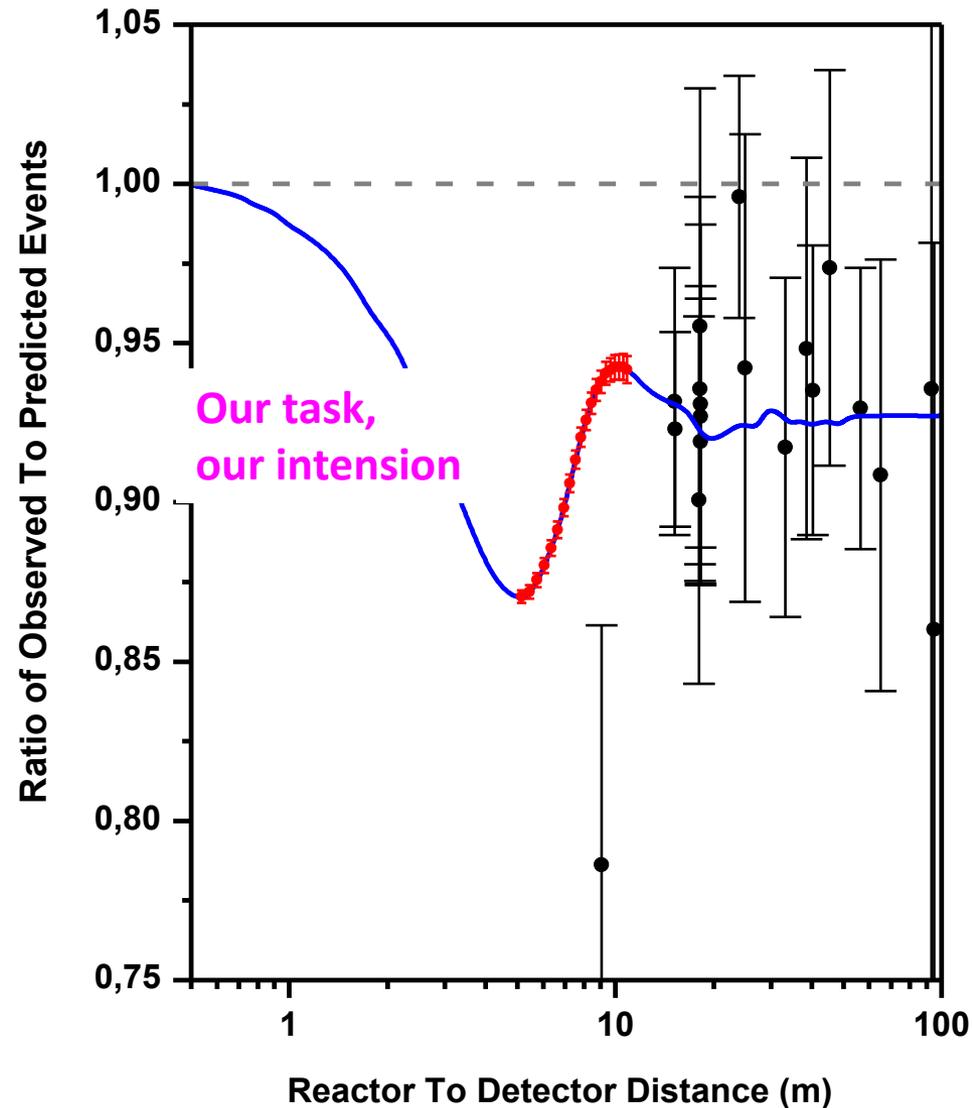
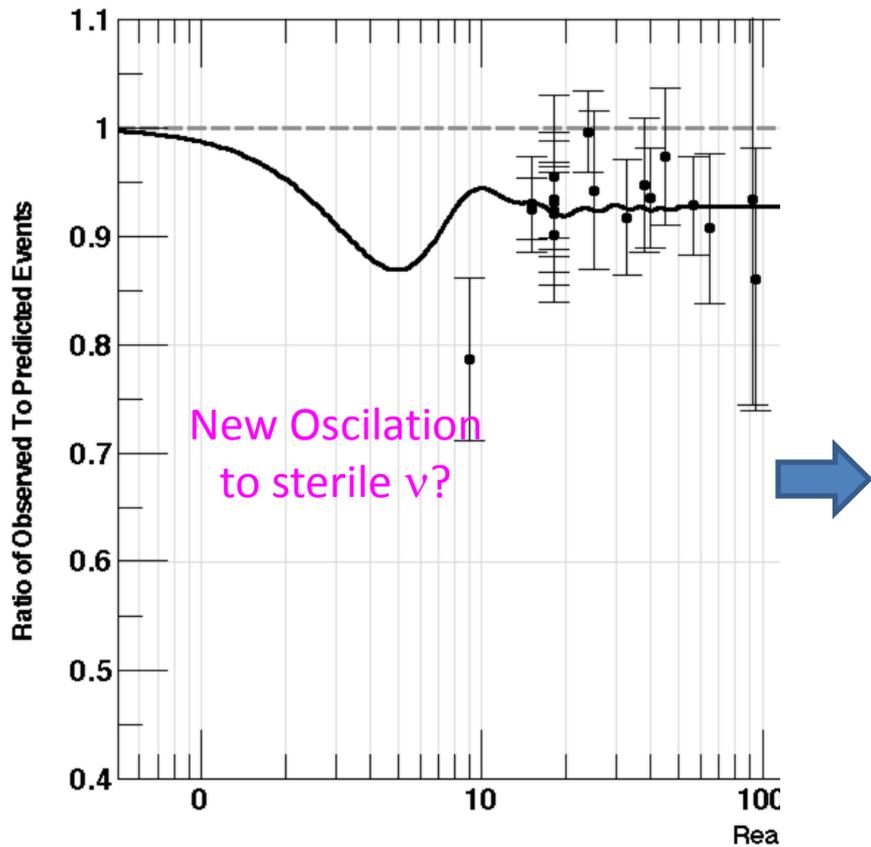
*See session 12*

# Phenomenology of Oscillations with Sterile Neutrinos (3+1 Models)

- In sterile neutrino (3+1) models, high  $\Delta m^2 \nu_e$  appearance comes from oscillation through  $\nu_s$ 
  - $\nu_\mu \rightarrow \nu_e = (\nu_\mu \rightarrow \nu_s) + (\nu_s \rightarrow \nu_e)$
- This then requires that there be  $\nu_\mu$  and  $\nu_e$  disappearance oscillations
  - Limits on disappearance then restrict any (3+1) models
- Strict constraint from CPT invariance
  - Neutrino and antineutrino disappearance required to be the same.



# Reactor Anomaly



# Worldwide Reactor Efforts



Location	Experiment	Reactor Power (MW)	Baselines (m)	Measures Oscillation Via:	Status
USA	SCRAAM	3000	24	Energy	Proposal
	ATR	110	7,12	Energy + Baseline	Proposal
	HFIR	85	7-10		
	NIST	20	4-13		
France	Nucifer	70	7	Rate, Energy	Built; Upgrading
	Stereo	50	7-9	Energy + Baseline	Proposal
Russia	Neutrino-4	18; 100	5-10	Energy + Baseline	Proposal
	DANSS	3000	9,12,18	Rate, Energy at multiple positions	Construction
Korea	Hanaro-4	30	6	Rate, Energy	Prototype

- Segmented detector allows oscillation versus baseline analysis
- Many scintillator options: Gd-doped LS, Li-doped LS, plastic scintillators

# Worldwide Reactor Efforts: USA

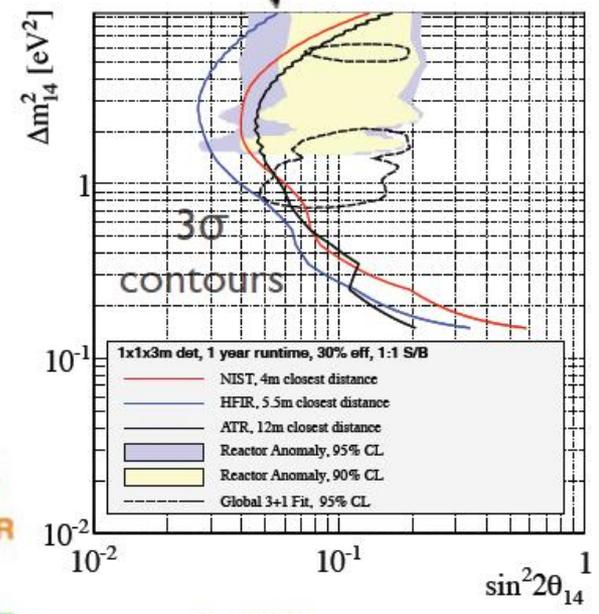


- Gaining consensus on one US-based effort

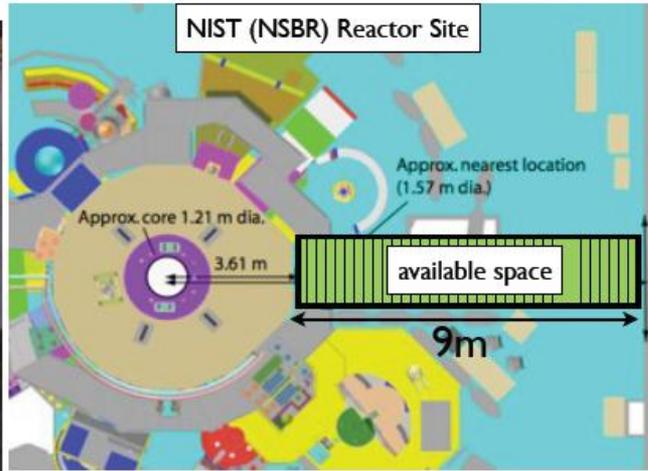
Heeger, Littlejohn, Mumm, et. al.  
See poster here at NNNI2!



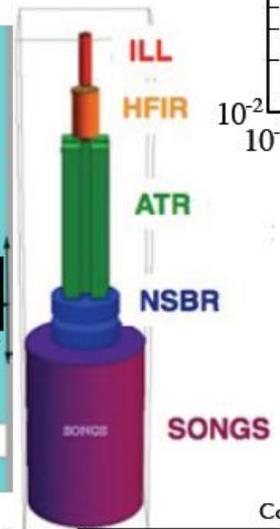
- Some sites have better available baseline: NIST
- Some sites have better thermal power: ATR
- Some site have smaller core size: HFIR
- US groups have significant experience building detectors for non-proliferation
- Also significant oscillation analysis experience



N. Bowden, SNAC 2011, Virginia Tech

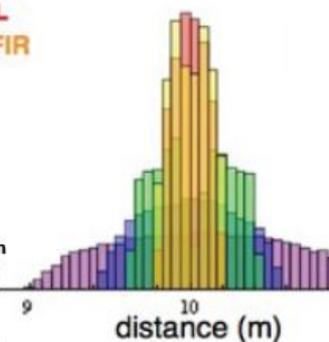


Courtesy of P. Mumm



Courtesy of M. Tobin

Core size comparison and baseline spread at 10m distance



# Reactor Monitoring Experiments for Sterile $\nu$ Searches



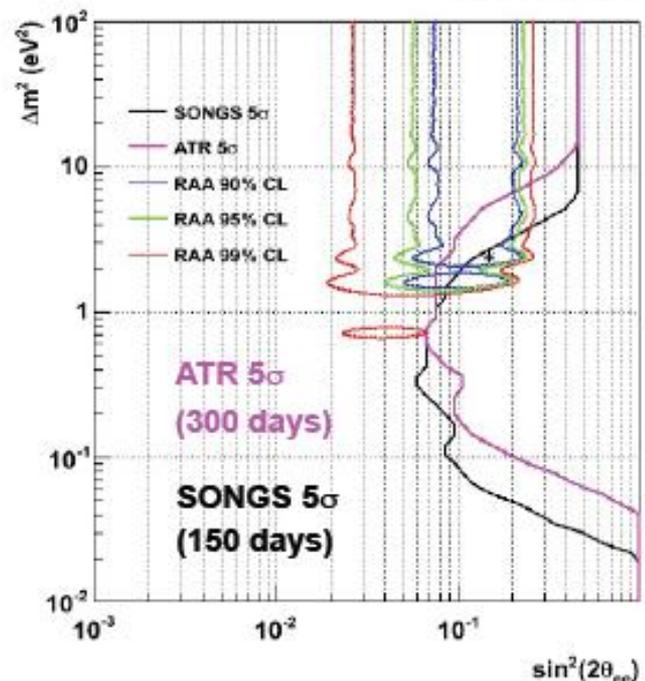
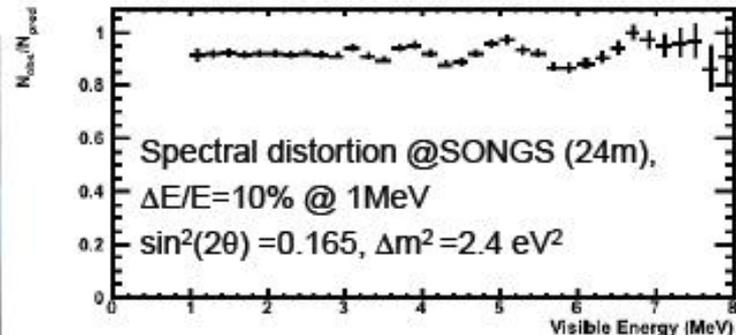
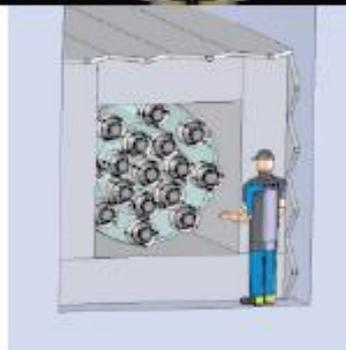
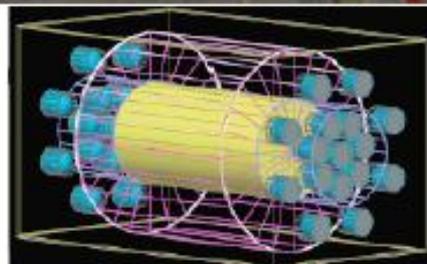
## SCRAAM: Southern California Reactor Antineutrino Anomaly Monitor



core  $\varnothing$ :  $\sim 3\text{m}$ ,  
fixed baseline: 24m

Adapt existing compact detector design/technology, limited by backgrounds

Limitations: Existing designs require overburden for background reduction – limits range of deployment sites, especially very close ( $<10\text{m}$ ) to compact cores



Ref: Bowden, poster 153-3

# Opportunities with Reactor Neutrinos in the US

Reactor	Power	Fuel	Baselines	Detector Status
NRL, MIT	5.5 MW	$^{235}\text{U}$	>3-4m	proposal ( <i>Ricochet, MIT</i> )
NBSR, NIST	20 MW	$^{235}\text{U}$	4-11 m	proposal ( <i>Mumm, KMH</i> )
ATR, Idaho	250 MW	$^{235}\text{U}$	12 m 6 m	proposal ( <i>SCRAAM, LLNL</i> ) site studies ( <i>Mumm, KMH</i> )
HFIR, Oak Ridge	85 MW	$^{235}\text{U}$	3 m (in water) >7m	site studies ( <i>Mumm, KMH</i> )
SONGS, San Onofre	2700 MW	$^{235}$ , $^{238}\text{U}$ , $^{239}$ , $^{241}\text{Pu}$	24 m	ongoing ( <i>LLNL</i> )

key reactor features: power, baseline, core size, on-off cycle fuel, overburden



established access to variety of research and commercial reactors in user mode

neutron and near-surface backgrounds are key issues

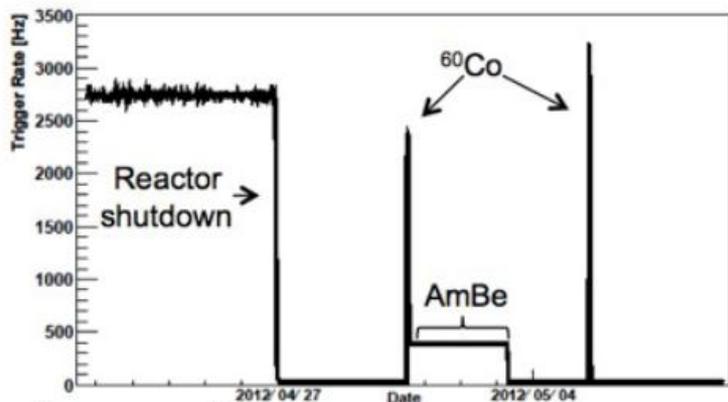
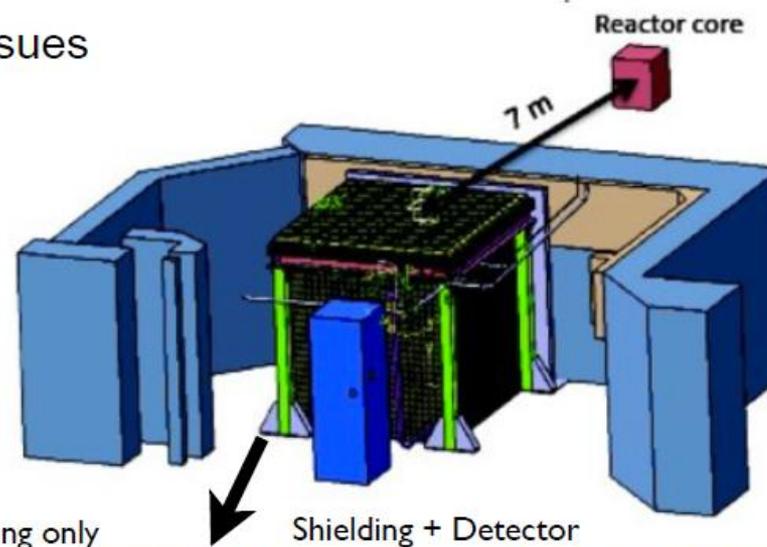
# Worldwide Reactor Efforts: France



## ● Nucifer

A.S. Cucoanes for Nucifer, TAUP 2011, Munich

- Measure energy spectrum distortion at one baseline
- Detector built, has taken test data in 2012
- Addressing gamma shielding and GdLS issues
- Start oscillation data-taking in 2013
- STEREO: Proposal for segmented detector at ILL



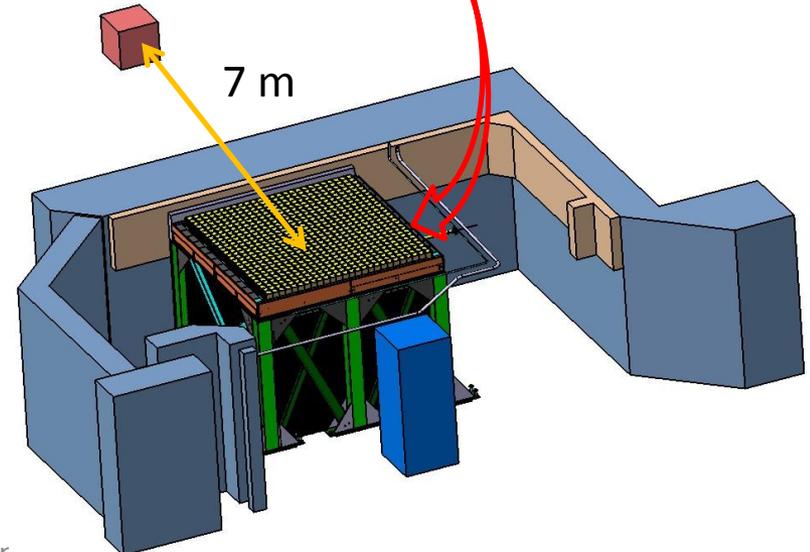
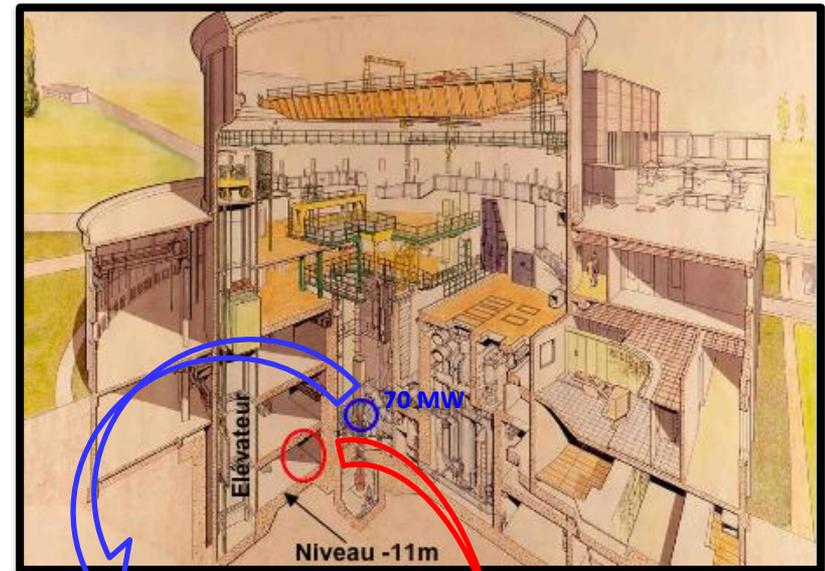
Figures courtesy of T. Lasserre



# Nucifer experiment

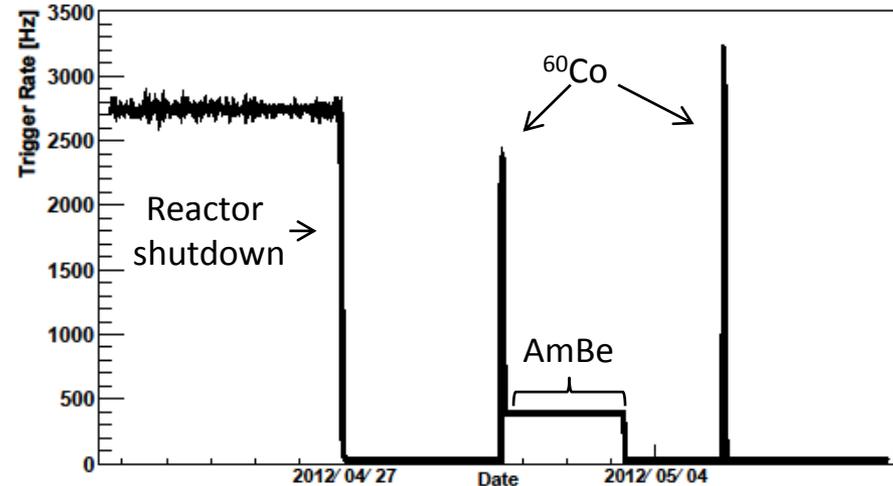
Contact: T. Lasserre,  
D. Lhuillier, M. Fallot

- Osiris research reactor
  - At Saclay, France
  - 70 MW,  $\sim 20\%$   $^{235}\text{U}$
  - Compact:  $61 \times 61 \times 63 \text{ cm}^3$
- Detector designed for reactor monitoring studies
  - 850 kg Gd-loaded liquid scintillator
  - $\sim 400$  neutrinos expected



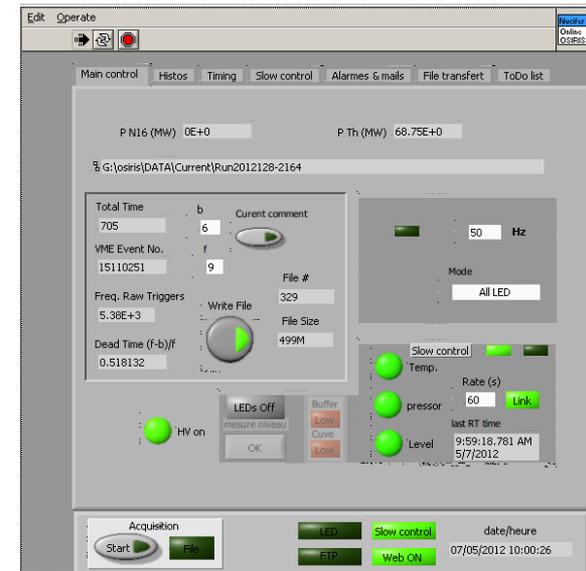
# Commissioning and data taking

- Data taking since april 2012
  - Agreement from French National Security Agency (ASN)
- Remote control & automatic data transfert
- Accurate monitoring (Rates, gains, P, T...)
- **Detector works well !**



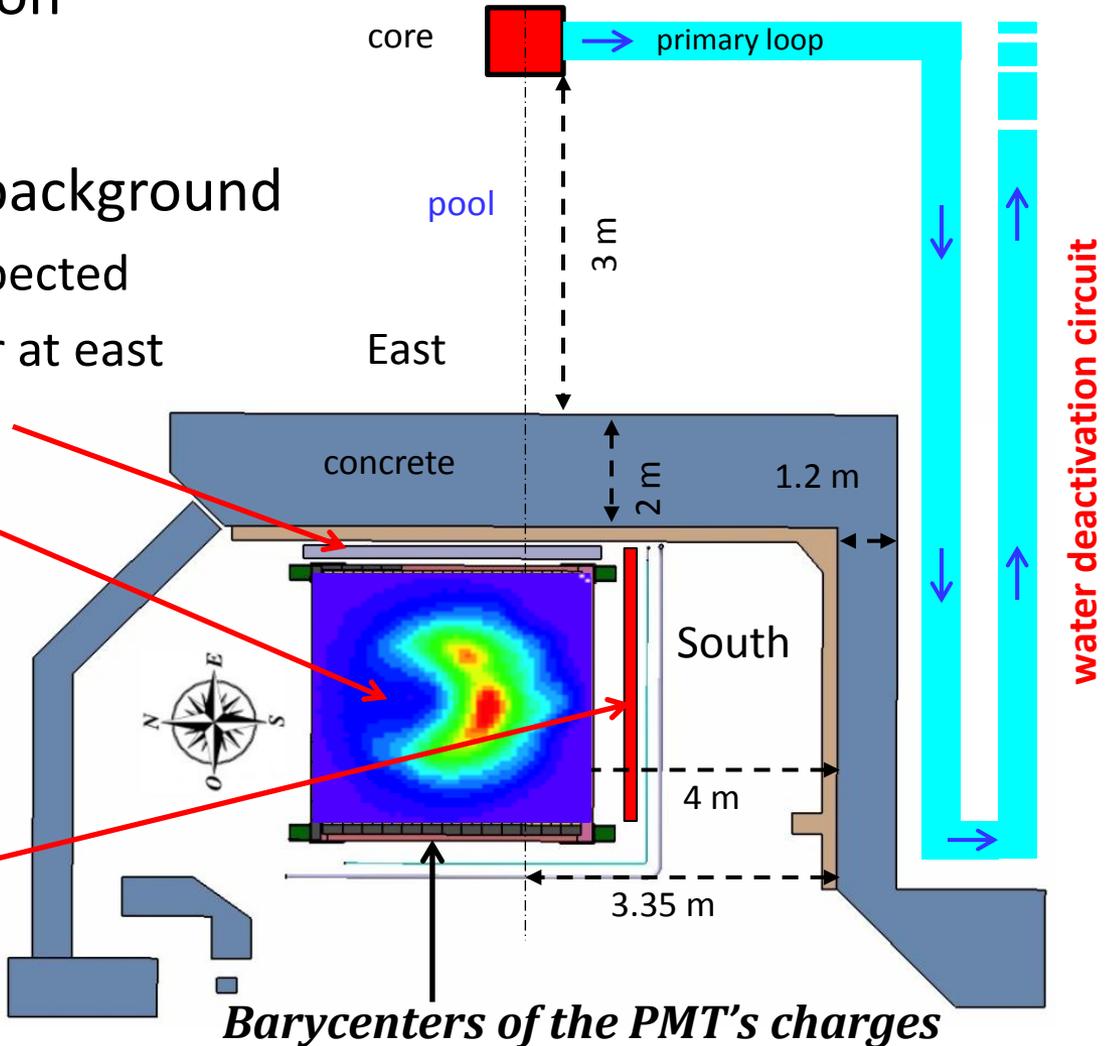
09/15/2012

- Jonathan Gaffiot - Reactor experiments to test sterile nu's



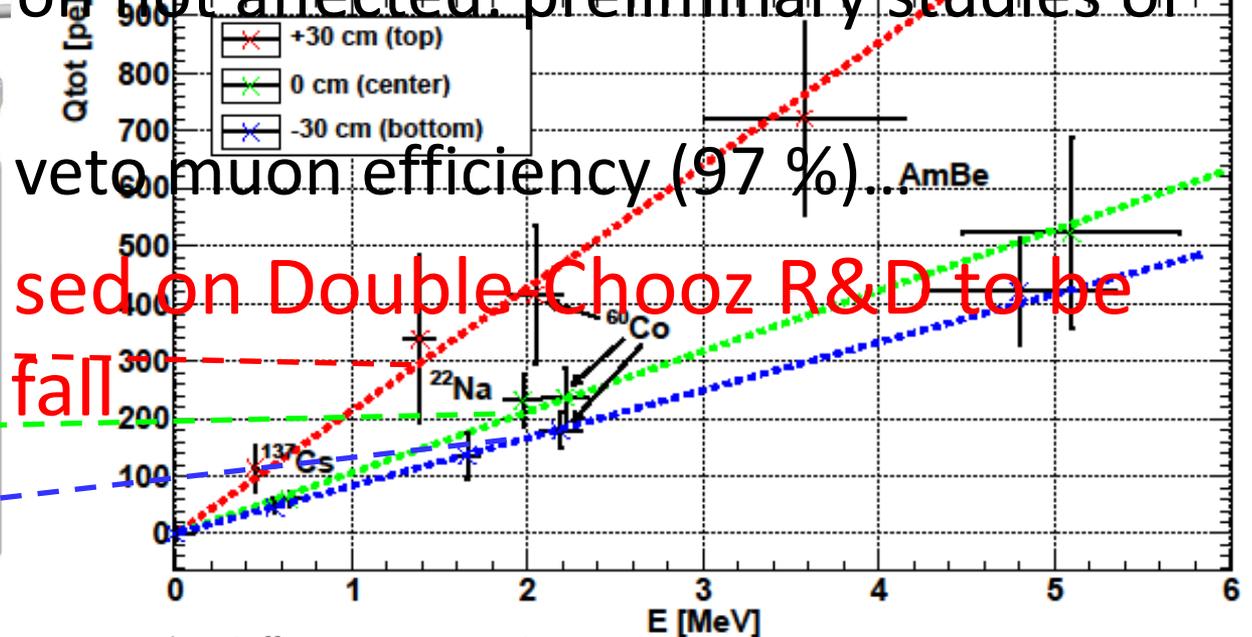
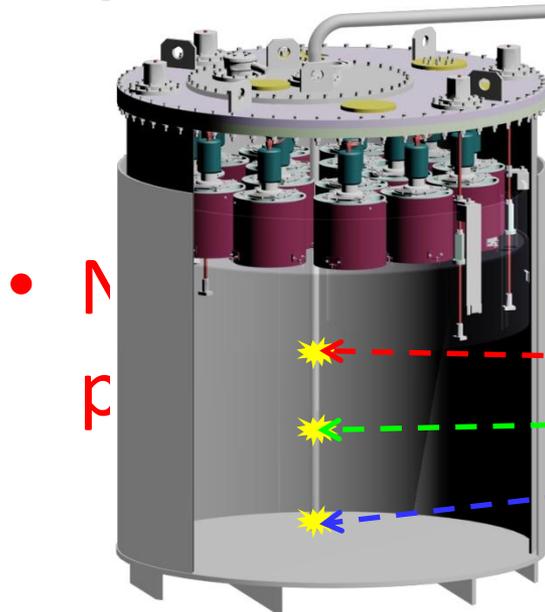
# Accidental background

- Reactor OFF background on expectation
- Unexpected reactor ON background
  - ~10 times higher than expected
  - Point to south, but reactor at east
  - Lead front wall is efficient
  - Expected level at north
- Primary loop water activation
  - High energy  $\gamma$  leakage from  $^{16}\text{N}$
- **New south lead wall**
  - Lead already acquired
  - Installation at end of 2012



# Liquid scintillator upgrade

- Liquid scintillator shows unexpected short attenuation length  $\sim 1\text{m}$ 
  - Vertex dependent energy reconstruction: degradation of energy resolution
  - Time resolution not affected: preliminary studies of

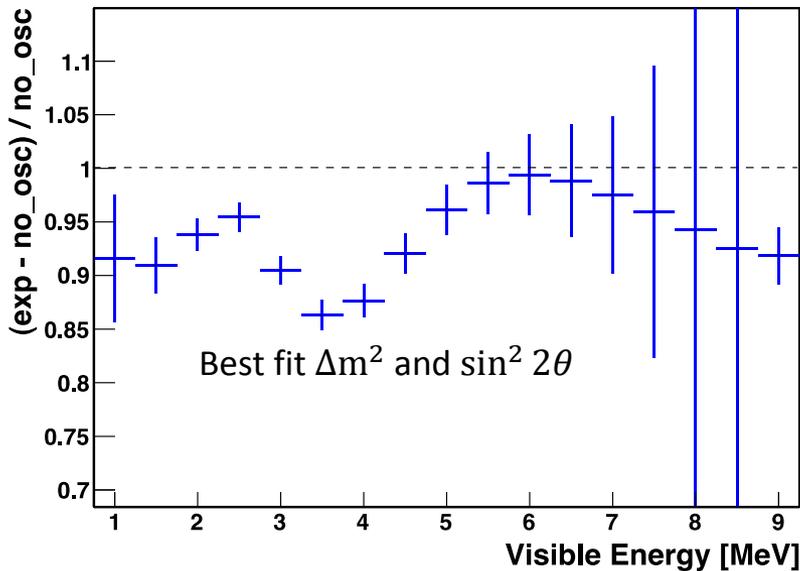


veto muon efficiency (97 %) ... AmBe  
 sed on Double Chooz R&D to be  
 fall

# Contour after upgrades

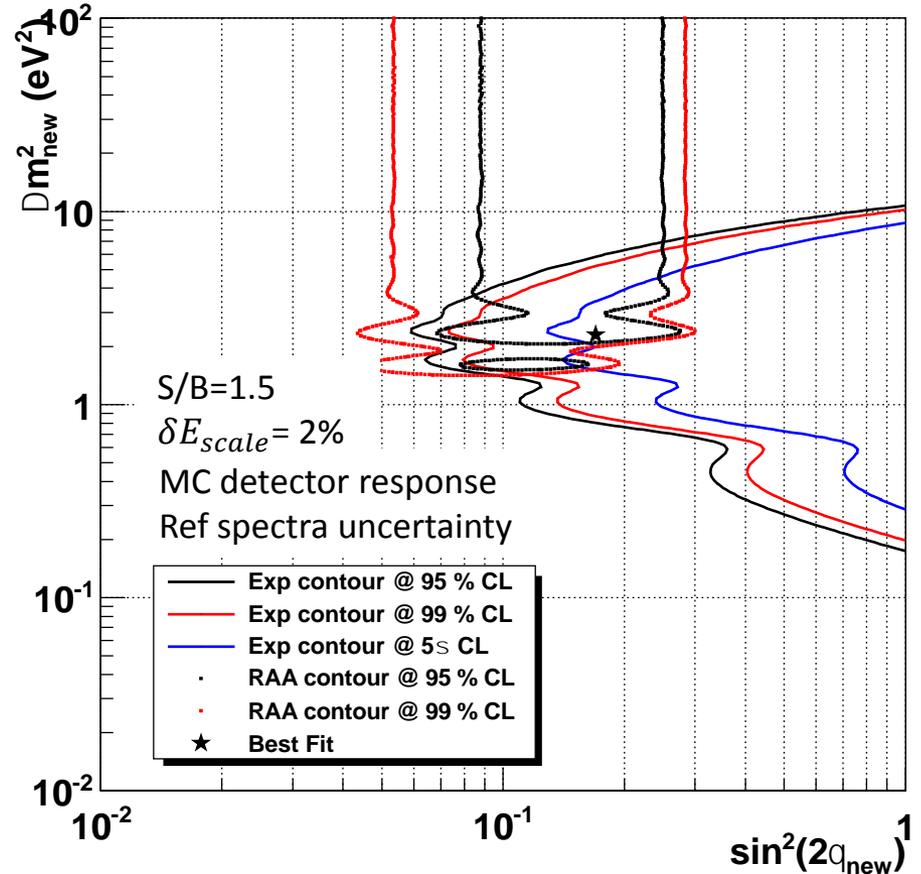
- Upgrades planned to be finished early 2013
- With upgrades:

300 days @ Osiris



Expected spectrum distortion

- Error stat only -

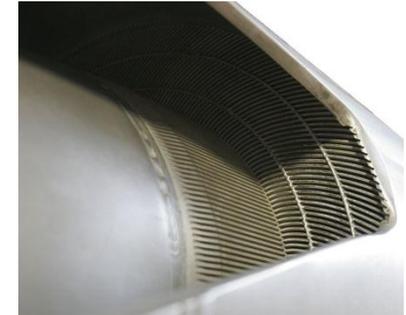
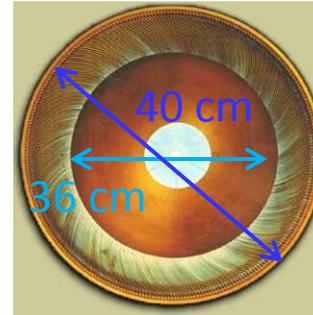


- If present, sterile  $\nu$  hint possible

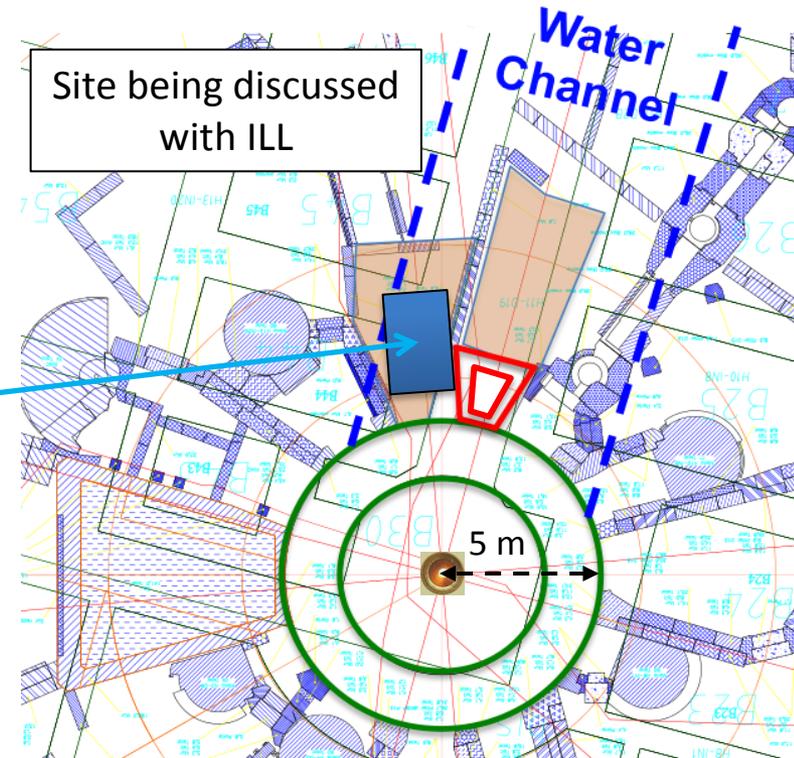
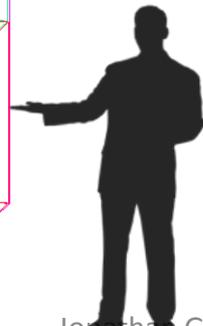
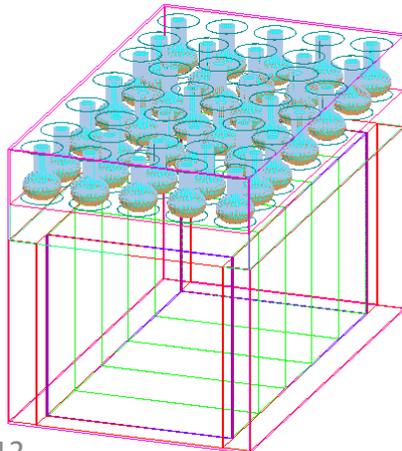
# STEREO project

Contact: D. Lhuillier

- French and German project
- ILL research reactor (Grenoble):
  - 57 MW, highly enriched U
  - Compact:  $h = 80$  cm,  $\Phi = 40$  cm
- Dedicated detector:
  - 5 segments: L and E oscillation
  - Active outer layer: high efficiency + veto
  - Muon flux attenuation = 4, thick  $\text{CH}_2$  and Pb walls (70 t)

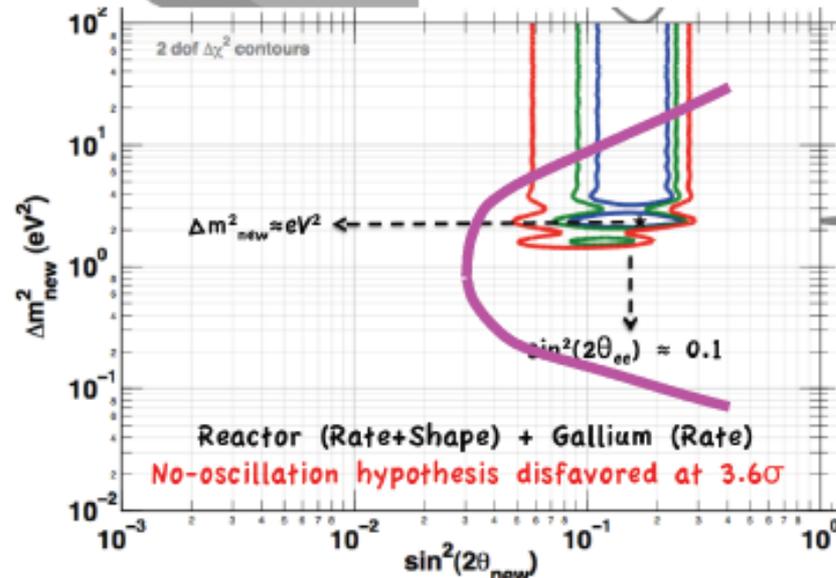
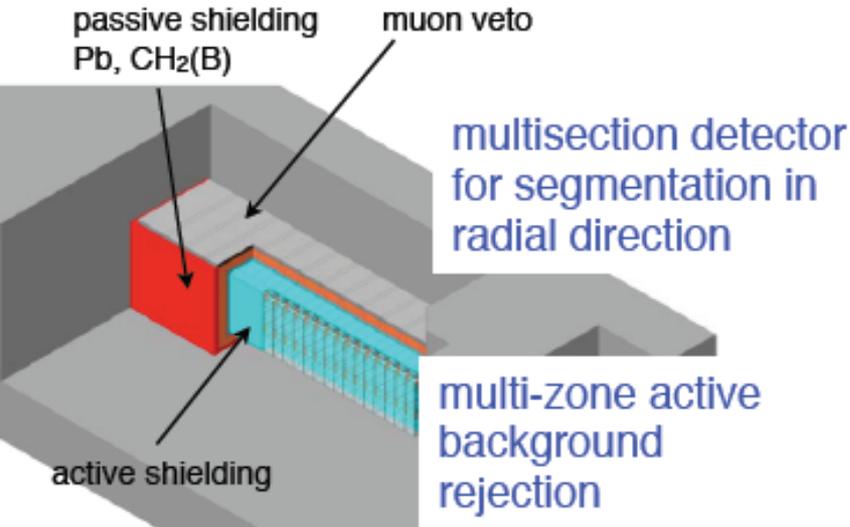


Target:  
Gd-doped  
liquid  
scintillator

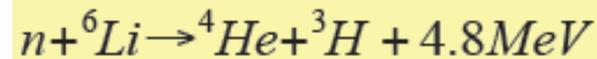
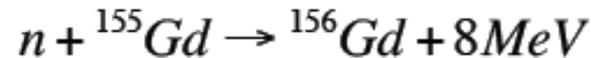
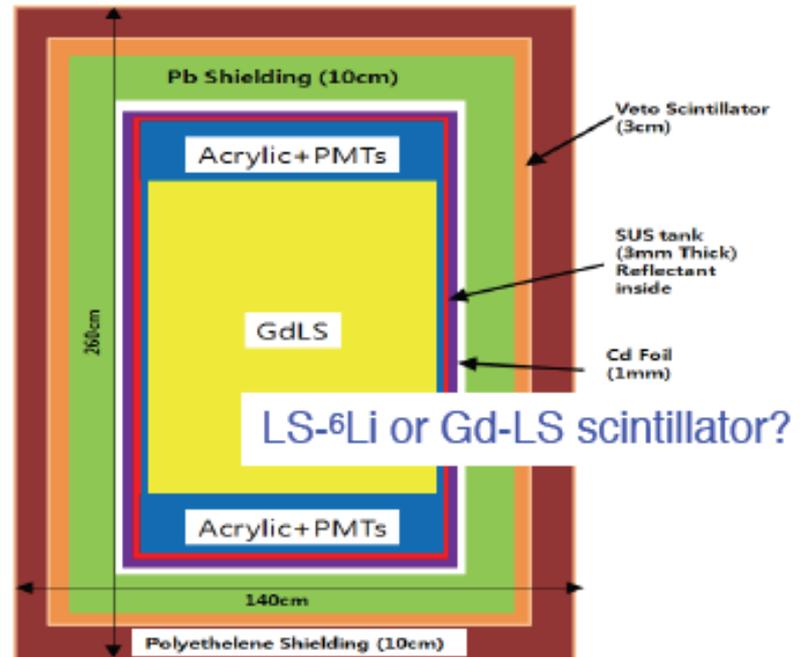


# Worldwide Effort Towards Optimized Sterile $\nu$ Search

## Neutrino4, Russia



## Hanaro-SBL, Korea



- $\gamma$ - $\alpha$  coincidence can effectively reject backgrounds
- PSF with  ${}^6\text{Li}$ -loaded scintillator may enable on-surface detector with minimal overburden

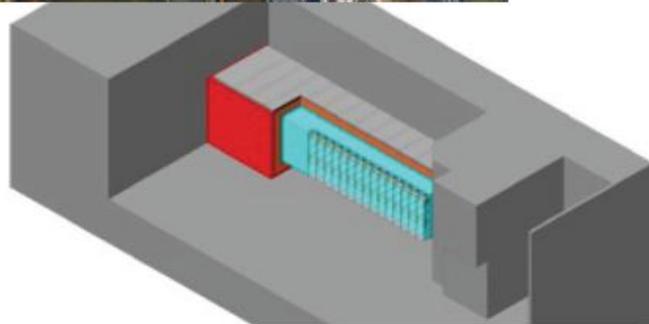
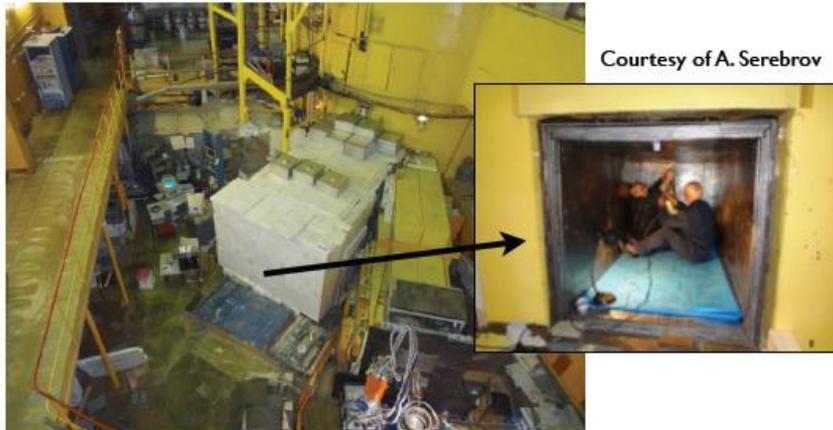
# Worldwide Reactor Efforts: Russia



## ● Neutrino-4

A. Serberov, et. al.  
arXiv:1205.2955

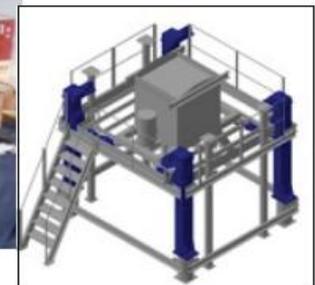
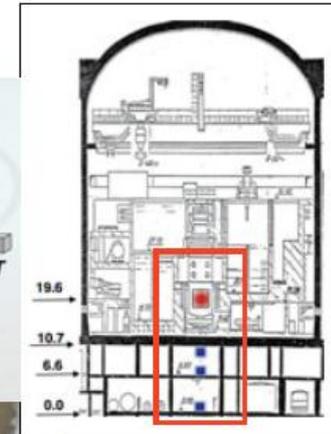
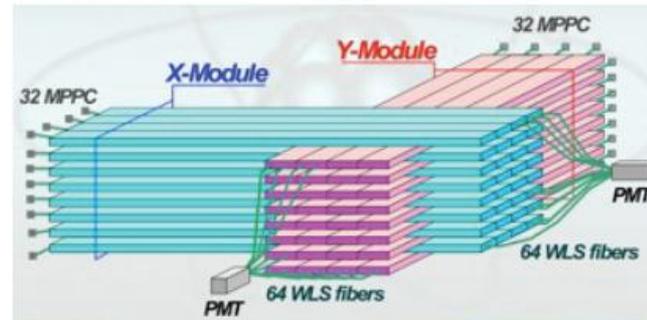
- Long, segmented detector, active shielding proposed
- Passive shielding built, characterized at 18 MW reactor
- Move to 100 MW reactor?



## ● DANSS

V. Egorov,  
TAUP2011

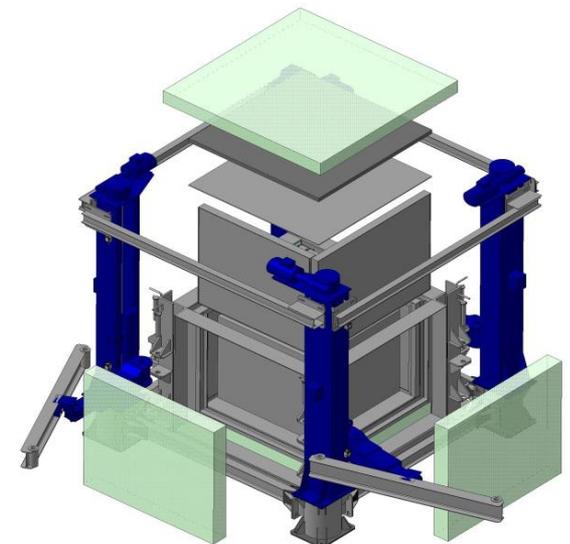
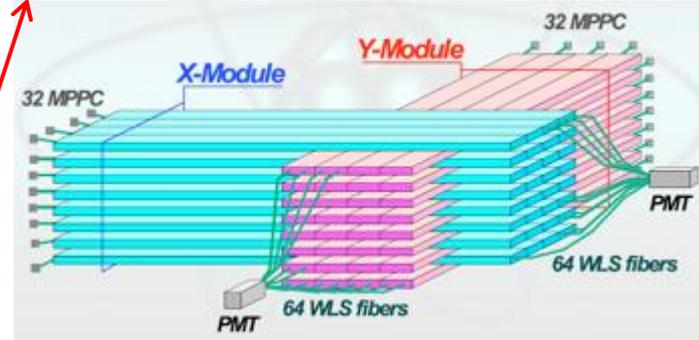
- At 3GW Commercial reactor
- Highly segmented solid scint detector being constructed - finish in 2012?
- Propose to use lift to move detector to different baselines



# DANSS experiment

Contact: V. Egorov

- Kalinin NPP #4 reactor
  - 3 GW<sub>th</sub> VVER (Russian PWR),  
extended core
- Segmented "XY" plastic scintillator:
  - Installation March 2013 (next OFF period)
  - Under the reactor (~ 50 m.w.e.)
  - Movable lifting platform: 9.7 < L < 12.2 m
  - 1 m<sup>3</sup> and ~10<sup>4</sup>  $\bar{\nu}_e$  / day



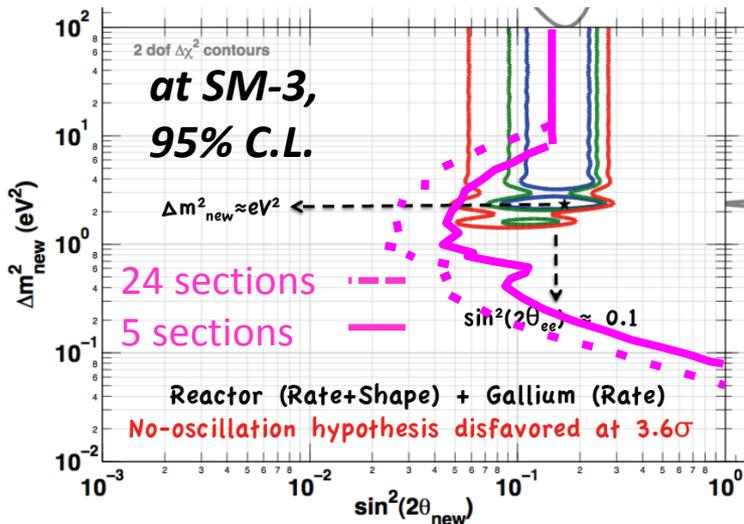
09/15/2012

- Jonathan Gaffiot - Reactor experiments to test sterile nu's

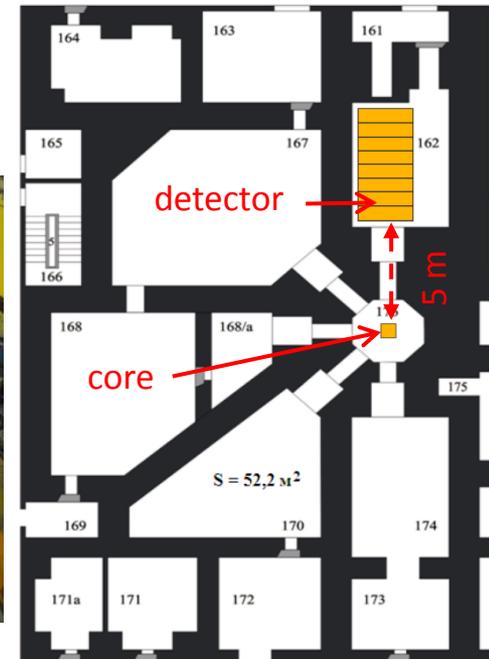
- Numerous tests with

# NEUTRINO-4 experiment

- SM-3 reactor in Dimitrovgrad (Russia):
  - 100 MW compact core (35x42x42 cm<sup>3</sup>)
- 2 detector geometries currently studied:
  - 24 sections 1.4x1.0x1.0 m<sup>3</sup>
  - 5 sections moveable at 6-12 m
- Preparation at WWR-M reactor in Gatchina
- Future realization at SM-3



WWR-M reactor, 18 MW  
Shielding studies



SM-3 reactor



---

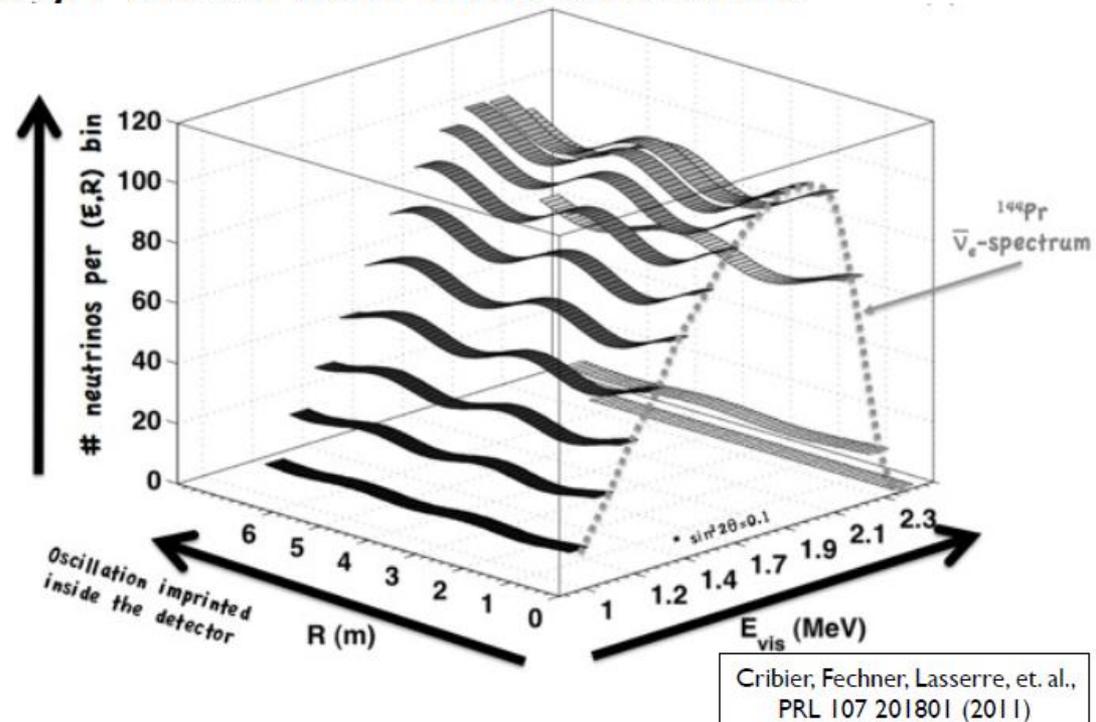
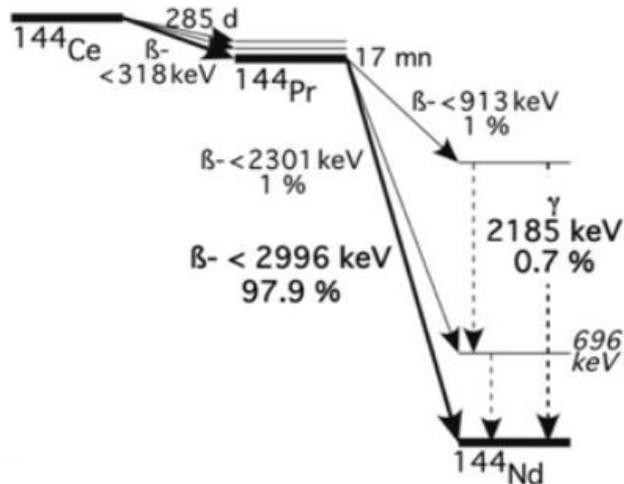
# $\nu / \bar{\nu}$ Source Sterile Searches

\* My apologies to experiments I didn't have time to mention: see backup slides!

# Antineutrino Sources: $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$



- Concentrated source of long-lived  $^{144}\text{Ce}$  beta emitter
  - $^{144}\text{Ce}$  is long lived, daughter  $^{144}\text{Pr}$  short-lived, high Q-value above IBD threshold
- Detect  $^{144}\text{Pr}$  decays via inverse beta decay
  - Low background coincidence signature
- Detect oscillation through distortion with baseline
  - Energy spectrum too narrow to exhibit much oscillation

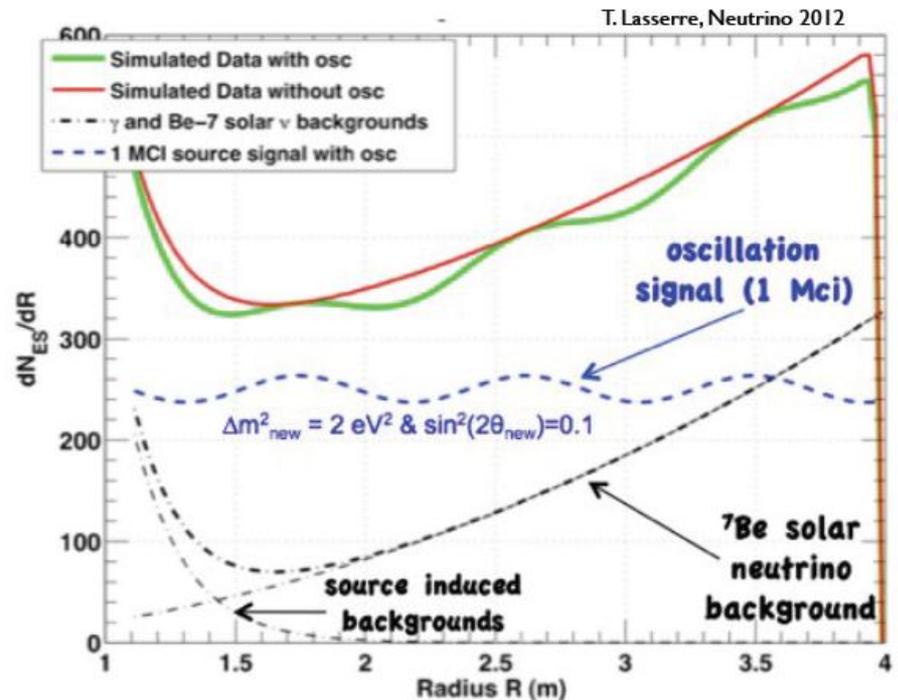
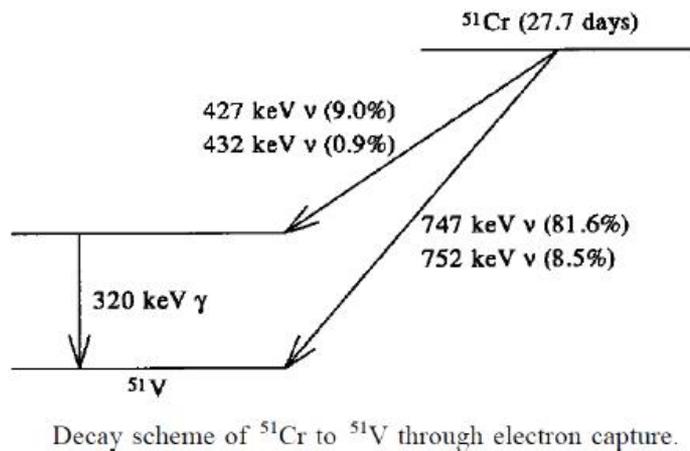


Cribier, Fechner, Lasserre, et al.,  
PRL 107 201801 (2011)

# Neutrino Sources: $^{51}\text{Cr}$



- $^{51}\text{Cr}$  electron capture source
  - Nearly mono-energetic 1-body decay, so oscillation doesn't drop off with distance!
- Detect via elastic scattering off electrons
  - Clean, low-threshold detectors required
- Detect oscillation through distortion with baseline

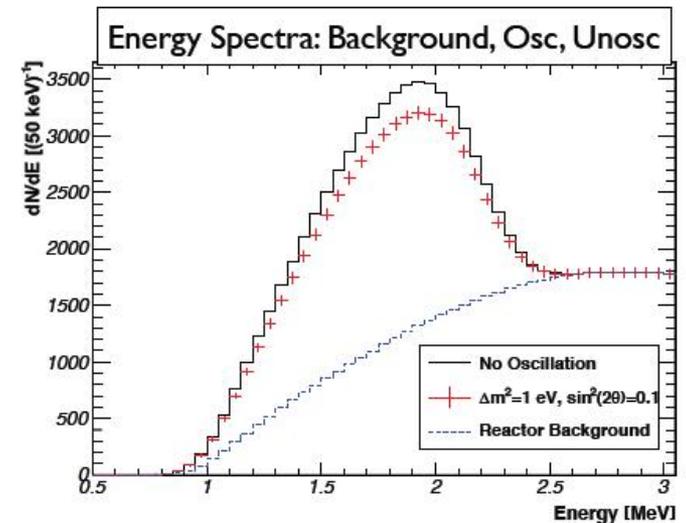
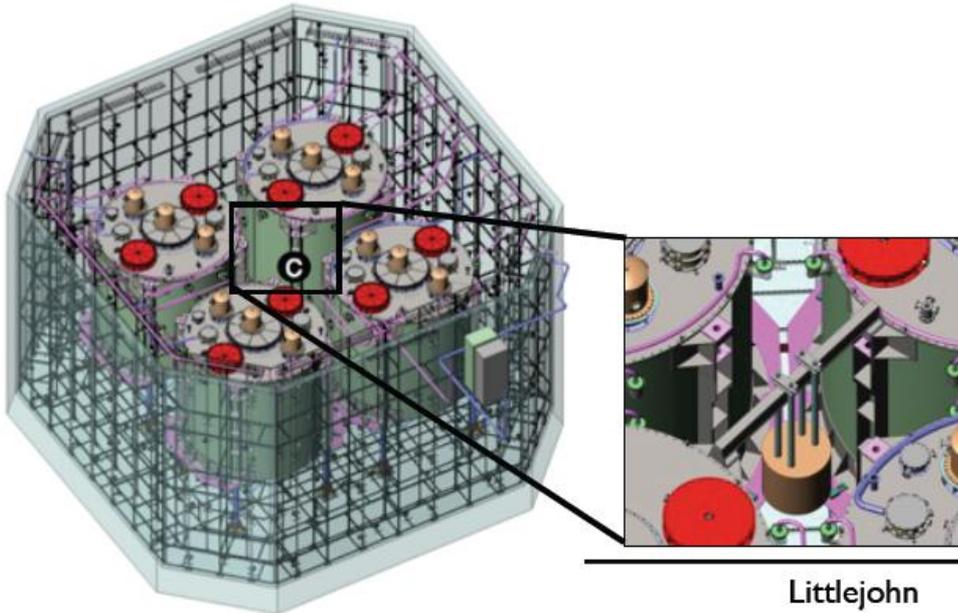
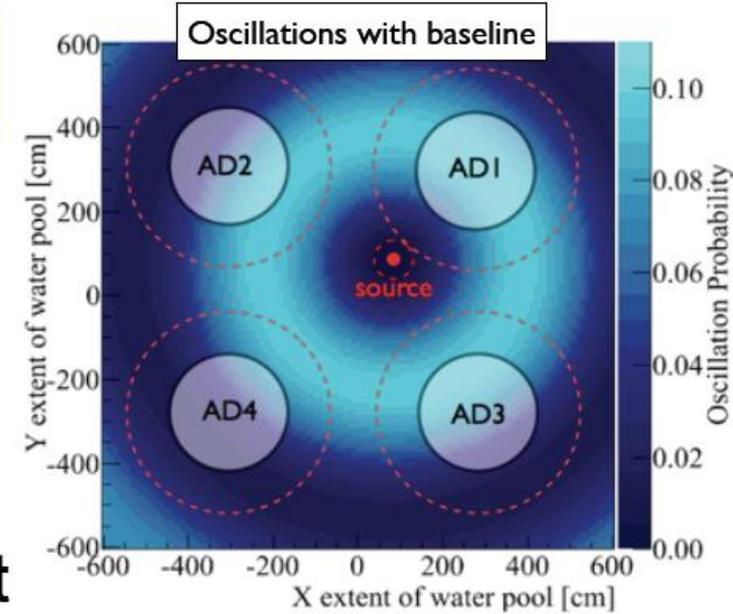


# Daya Bay Source Experiment



- 0.5 MCi  $^{144}\text{Ce}$  source
  - 35,000 events/year
  - 35 cm tungsten shielding
- 'Easy' deployment in far hall water pool: detectors undisturbed
  - Multiple source locations to check osc behavior
- Could install after  $\theta_{13}$  measurement

Dwyer, Heeger,  
Littlejohn, Vogel  
arXiv:1109.6036 [hep-ex]



# CeLAND



- 0.05 MCi  $^{144}\text{Ce}$  source

- 40,000 events/year
- 40 cm tungsten shielding

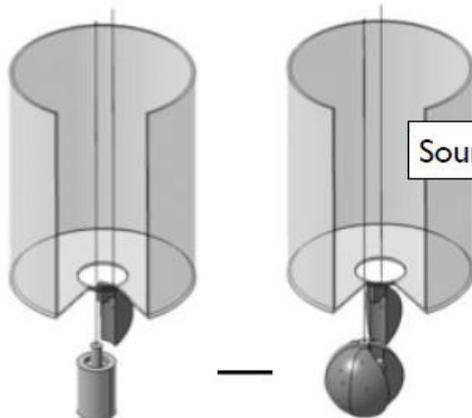
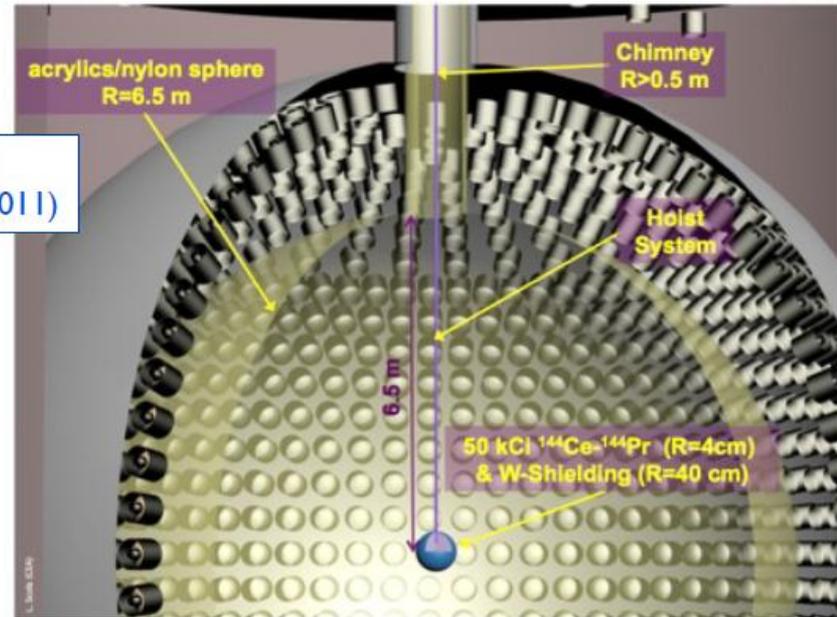
Cribier, et. al.,  
PRL 107 201801 (2011)

- Deployed inside detector

- Shield and source combined in-situ to fit down chimney
- See many oscillation periods

- Conflicts with KamLAND-Zen

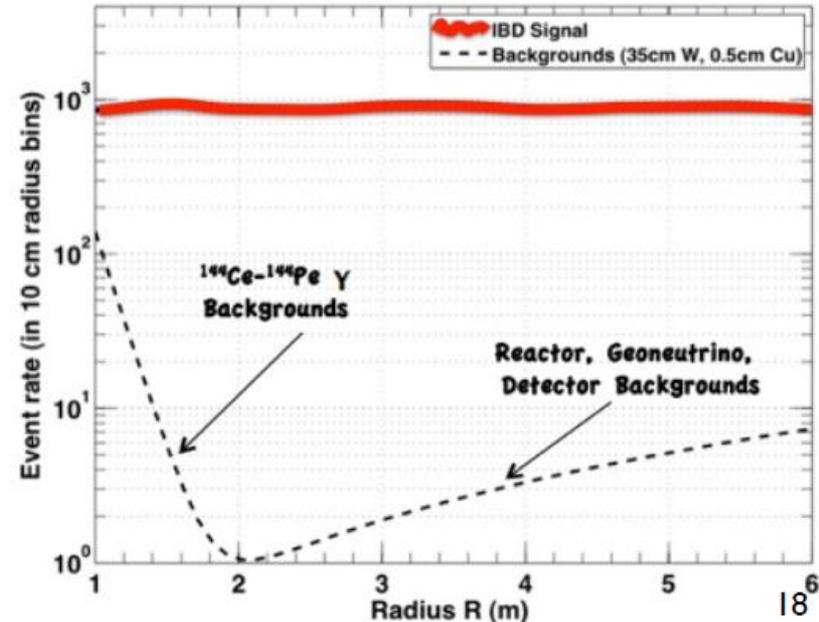
- Schedule after 2015 will be clearer after October collaboration meeting



Source - shielding Deployment

October

Littlejohn

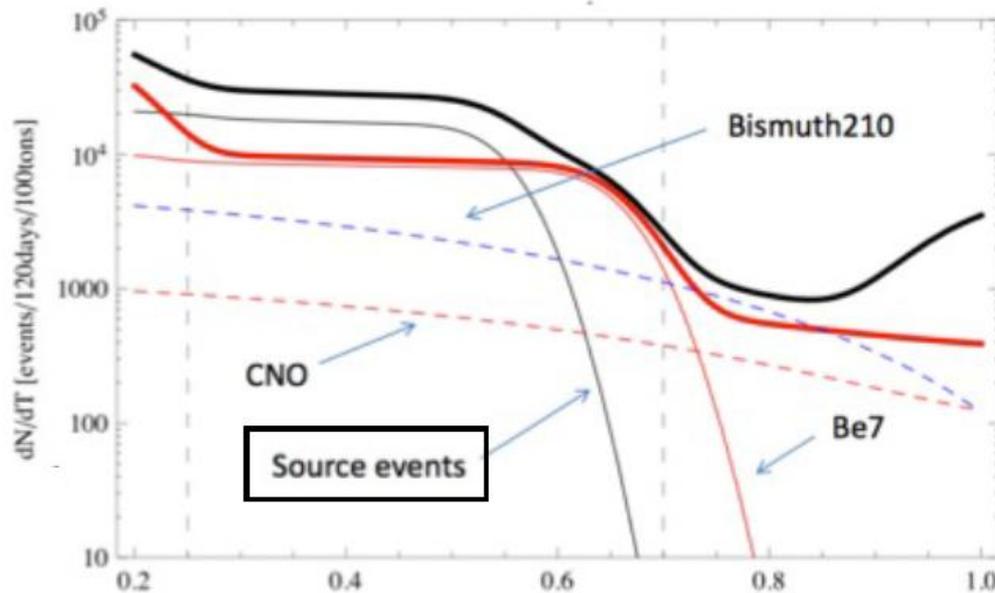
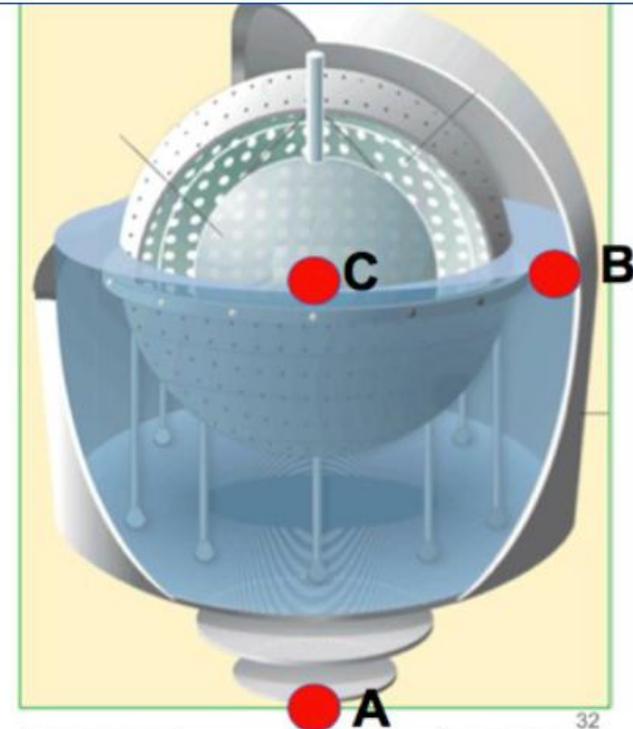


# Borexino



- 0.05 M Ci  $^{144}\text{Ce}$  source at center
  - Like CeLAND; not until after 2015
- $\sim 10$  M Ci  $^{51}\text{Cr}$  source below detector
  - Absolute rate measurement - no oscillimetry
  - Must measure source activity to  $< 1\%$
  - Possible before 2015

See Borexino Collab in Sterile Nu White Paper



# SNO+ Sterile



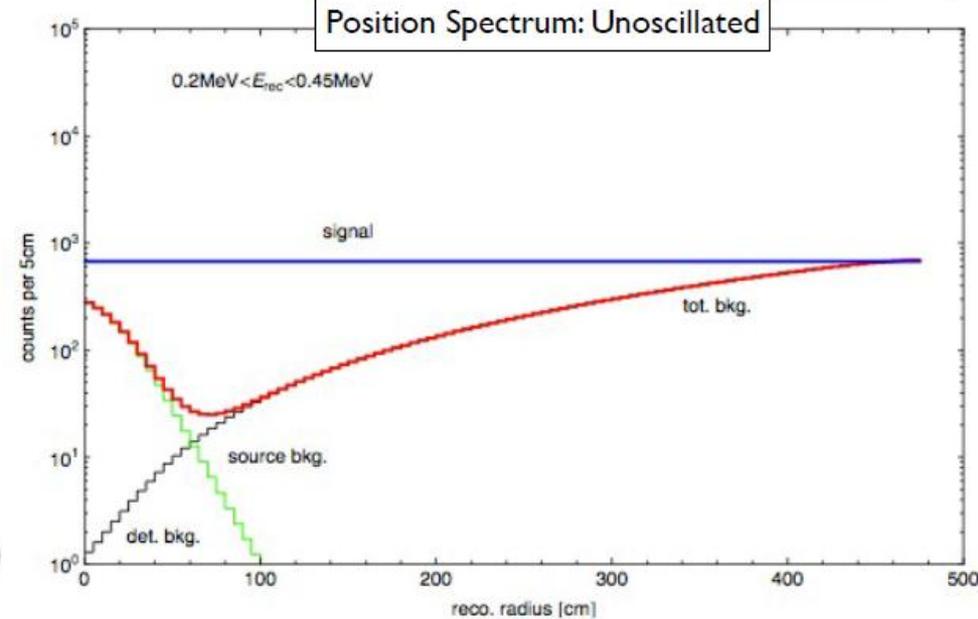
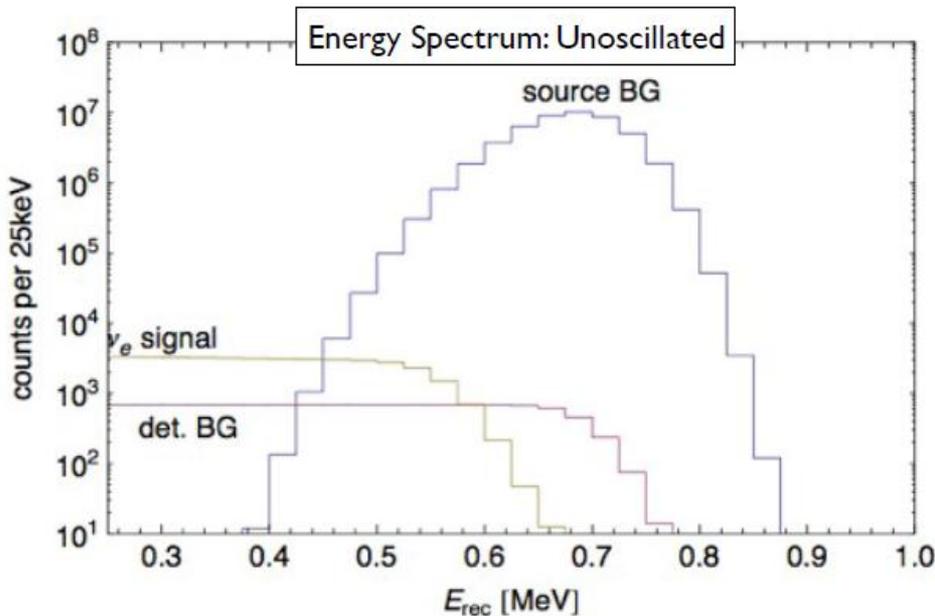
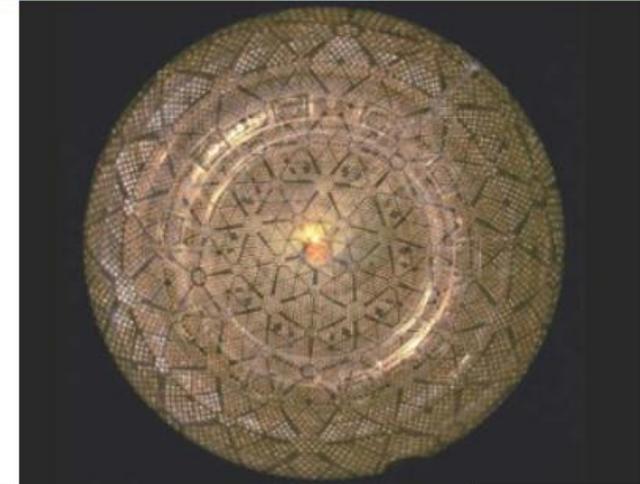
- 1+ MCi  $^{51}\text{Cr}$  source inside SNO+

- Oscillation with baseline
- Deployment is easy with wide SNO chimney
- Must have high-purity Tungsten shield

- Conflicts w/ SNO+ Nd phase: 2014

- Deploy after multi-year Nd phase?

See J. Link, P. Huber in Sterile Nu White Paper



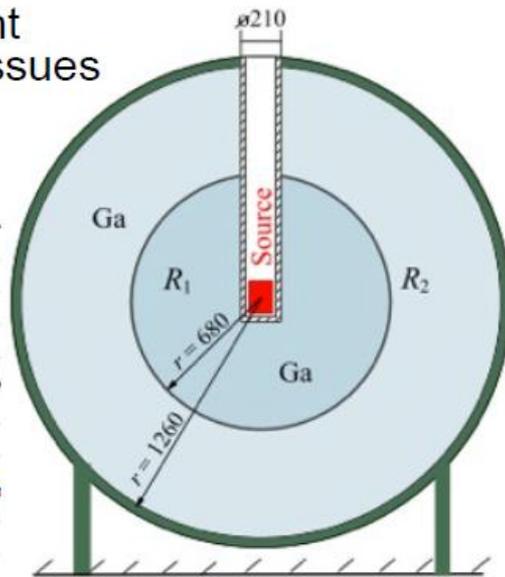
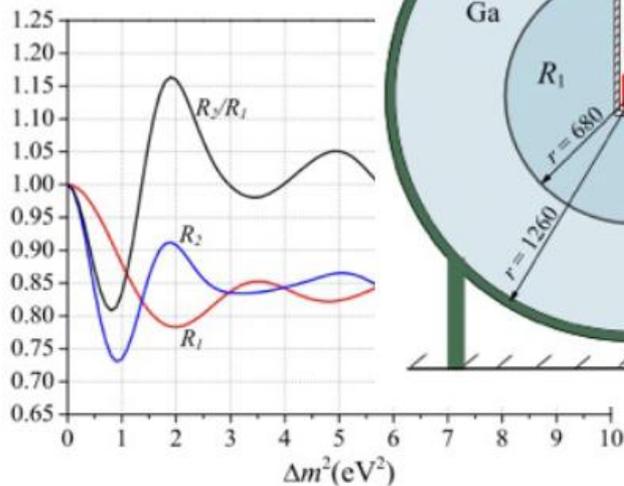
# Other Worldwide Reactor Efforts



## ● SAGE 2

See B. Cleveland, et al. in Sterile Nu White Paper

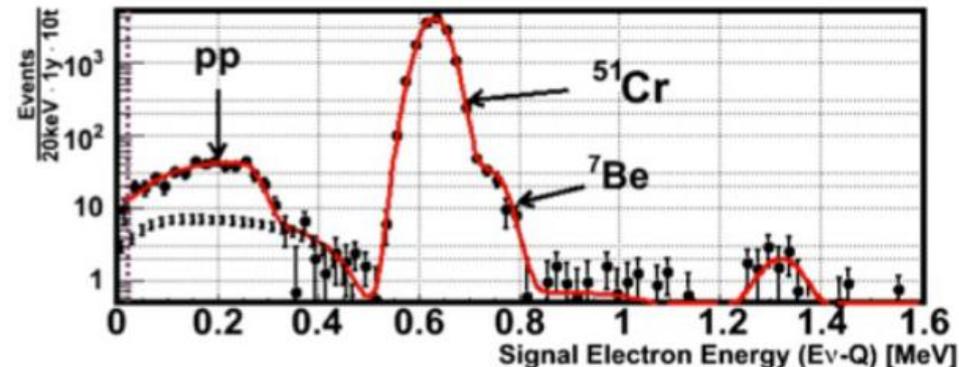
- Re-do SAGE  $^{51}\text{Cr}$  calibration with a 2-zone detector
- 3 MCi source
- Measure relative rate differences between zones
- Significant funding issues



## ● LENS Sterile

See LENS Collab. in Sterile Nu White Paper

- 10 MCi  $^{51}\text{Cr}$  next inside LENS detector
- Time coincidence: nu capture on Indium
- Nearly background-free measurement
- 1/2000 prototype exists: MicroLENS presented at APS 2012 meeting
- Much prototyping, R&D left to do



# Sterile Searches: Feasible Timelines

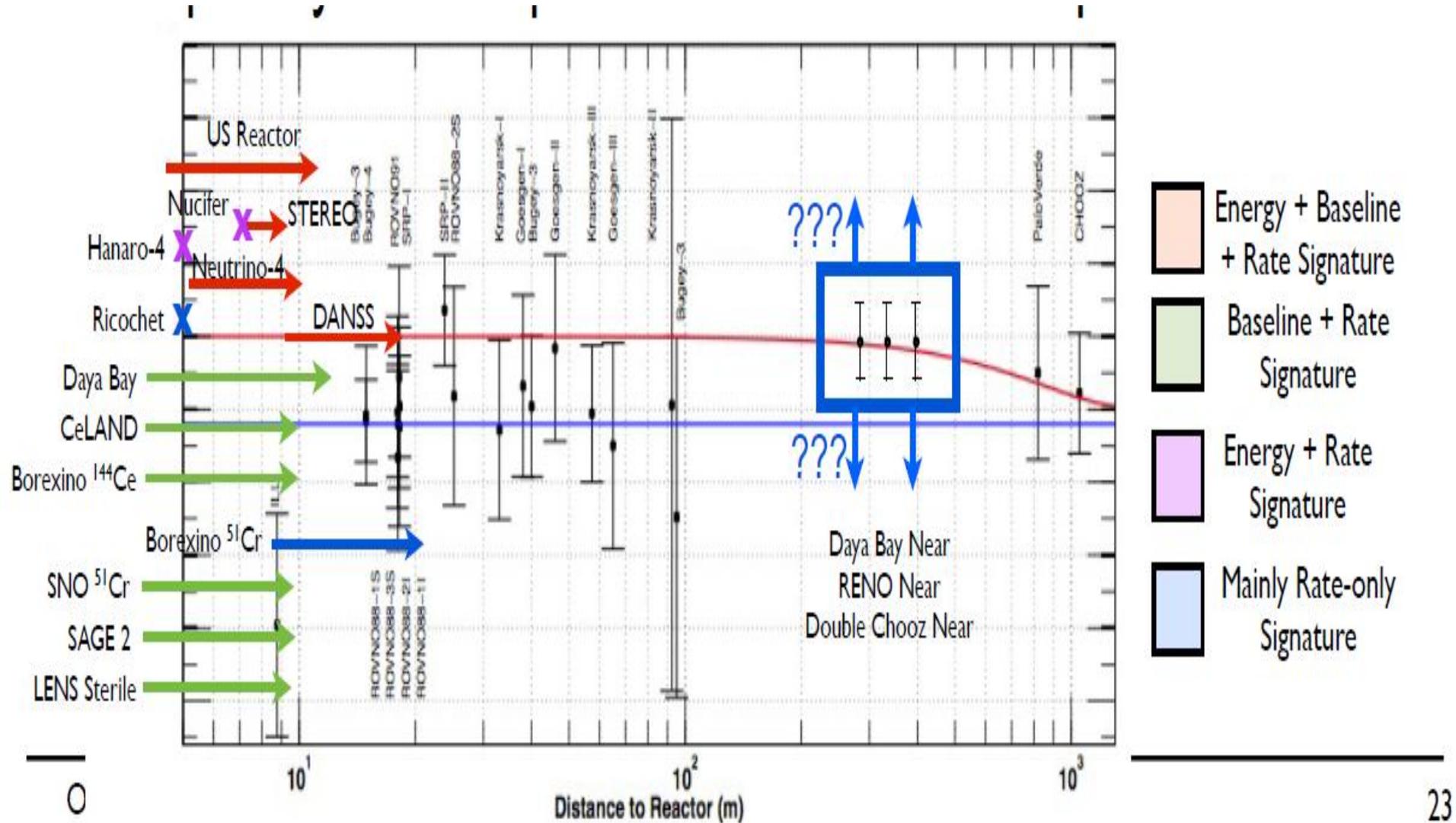


**\*\*NOTE\*\* - All dates are estimates - most proposals have no funding yet!**

		2013	2014	2015	2016	2017+	
Reactor	US Reactor	???					<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="margin-bottom: 10px;"><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #f4a460; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Energy + Baseline + Rate Signature</div> <div style="margin-bottom: 10px;"><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #c8e6c9; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Baseline + Rate Signature</div> <div style="margin-bottom: 10px;"><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #fff9c4; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Energy + Rate Signature</div> <div><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #bbdefb; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Mainly Rate-only Signature</div> </div>
	Nucifer						
	Stereo	???					
	Neutrino-4	???					
	DANSS	???					
	Hanaro-4	???					
	Ricochet	Not sure... 'new' technology, so much R&D remaining					
Antinu Source	Daya Bay Sterile	xxx $\theta_{13}$ running xxx					
	CeLAND	xxx KamLAND-Zen running xxx			???		
	Borexino $^{144}\text{Ce}$	xxx Solar nu running xxx		???			
Nu Source	SNO+ $^{51}\text{Cr}$		xxx Nd phase running xxx		???		
	LENS Sterile	Not sure... 'new' technology, so much R&D remaining					
	Borexino $^{51}\text{Cr}$	???					

- Reactors appear to lead the way in terms of schedule
- Source experiments limited in time by competing detector uses

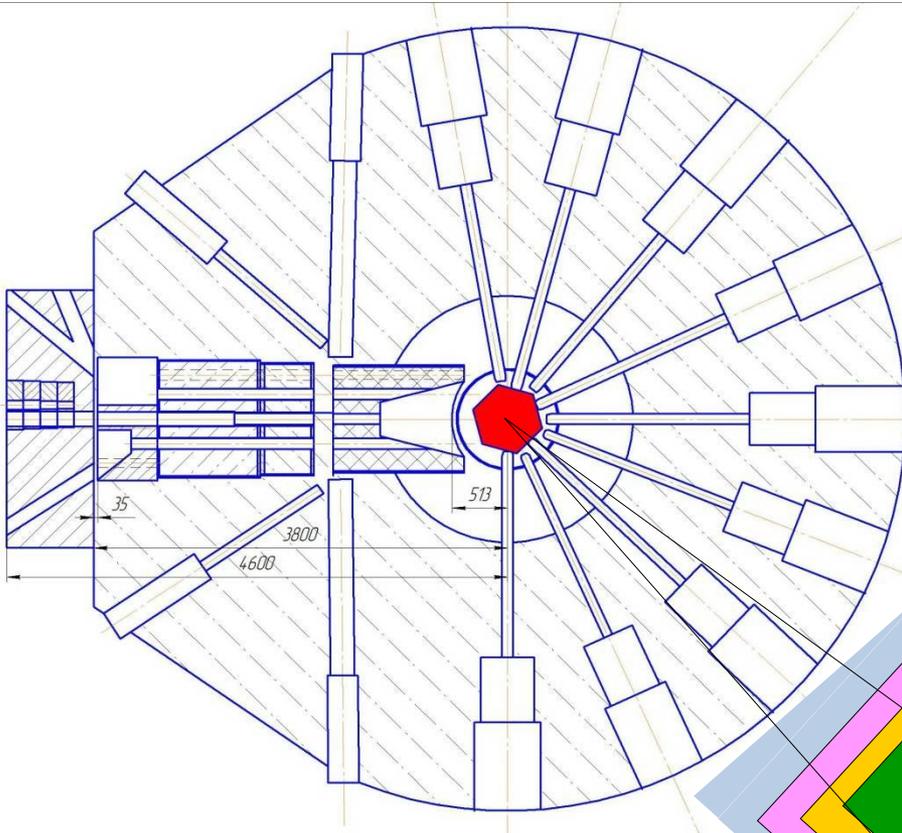
# 14 реакторных экспериментов на старте



*Эксперимент* **NEUTRINO-4**  
*по поиску стерильного нейтрино*

*в ПИЯФ,  
и на СМ-3  
(выбор стратегии)*

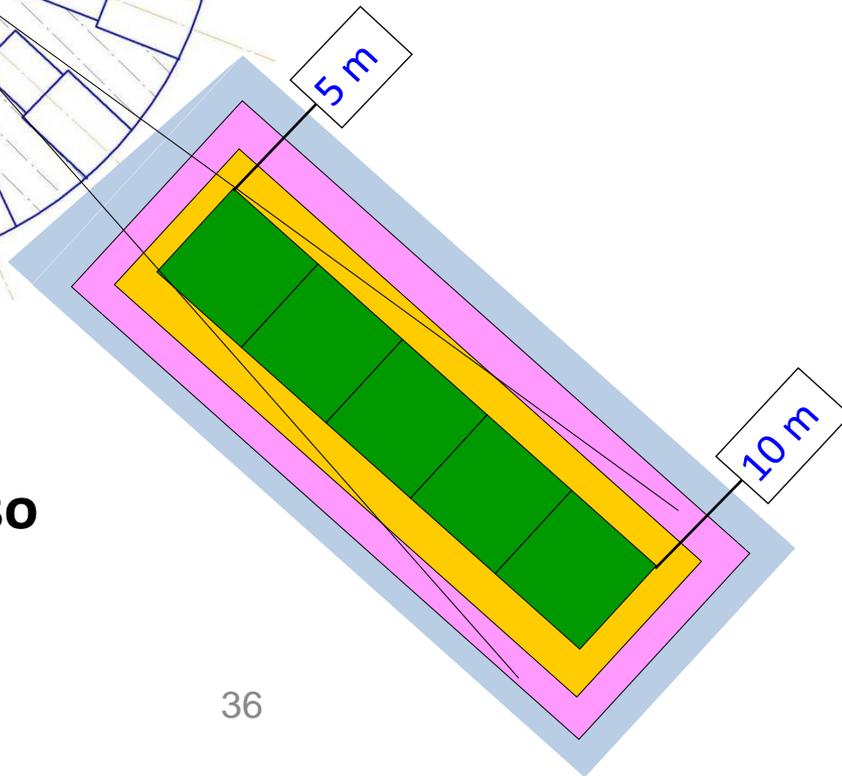
# Possible scheme at WWR-M reactor PNPI



**Reactor power - 18 MW**  
**Size of active core – 0.6 m**

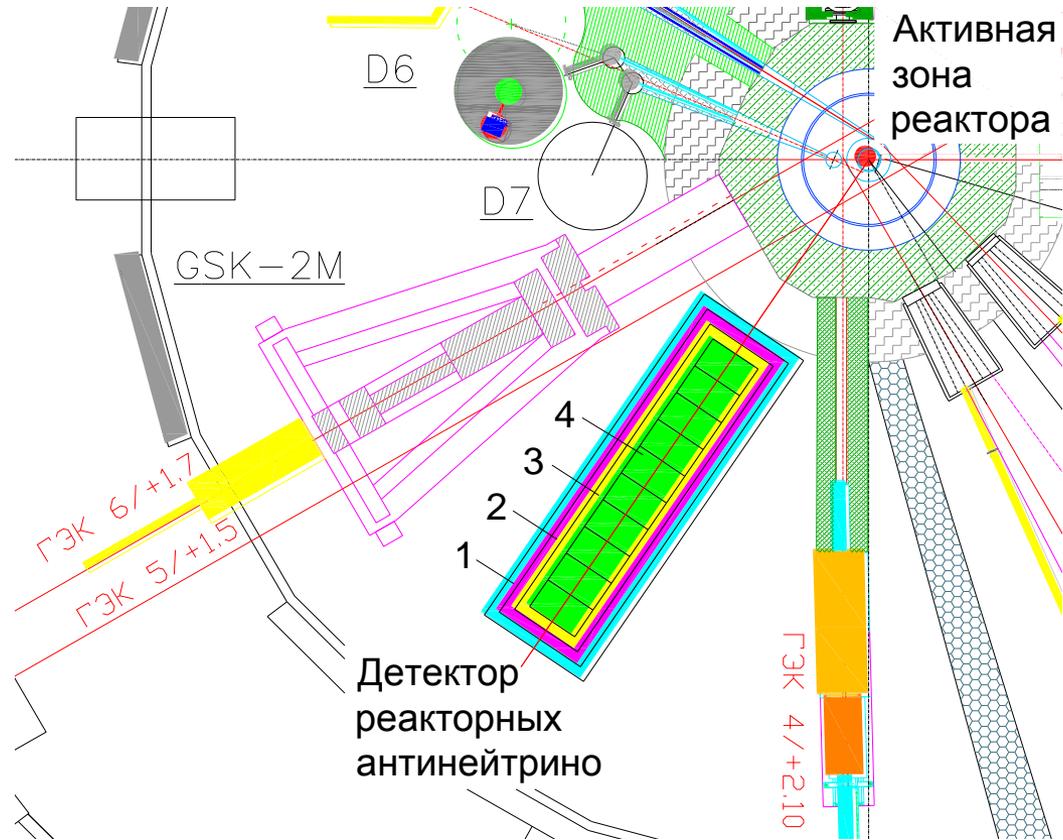
**Experimental base 5 – 10 m**

**Detector have to be  
position sensitive and also  
spectrum sensitive**



# Possible scheme at PIK reactor in PNPI

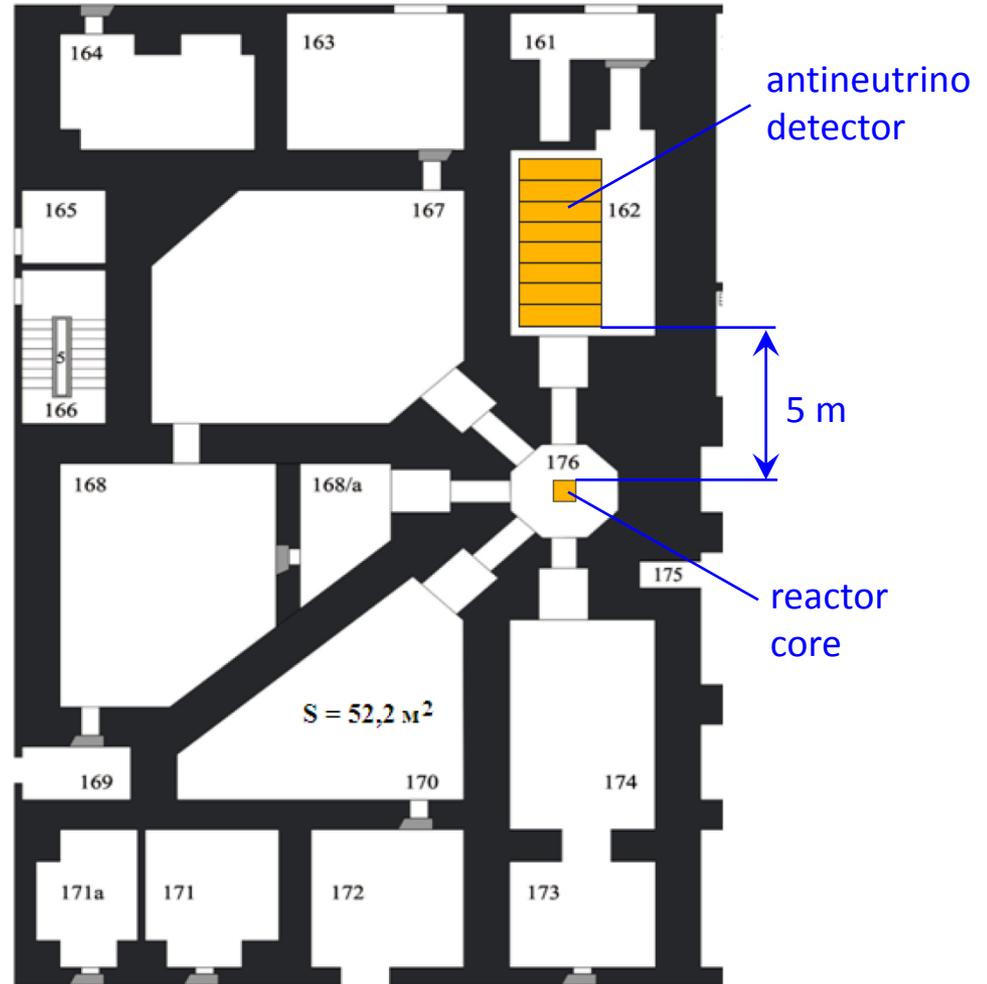
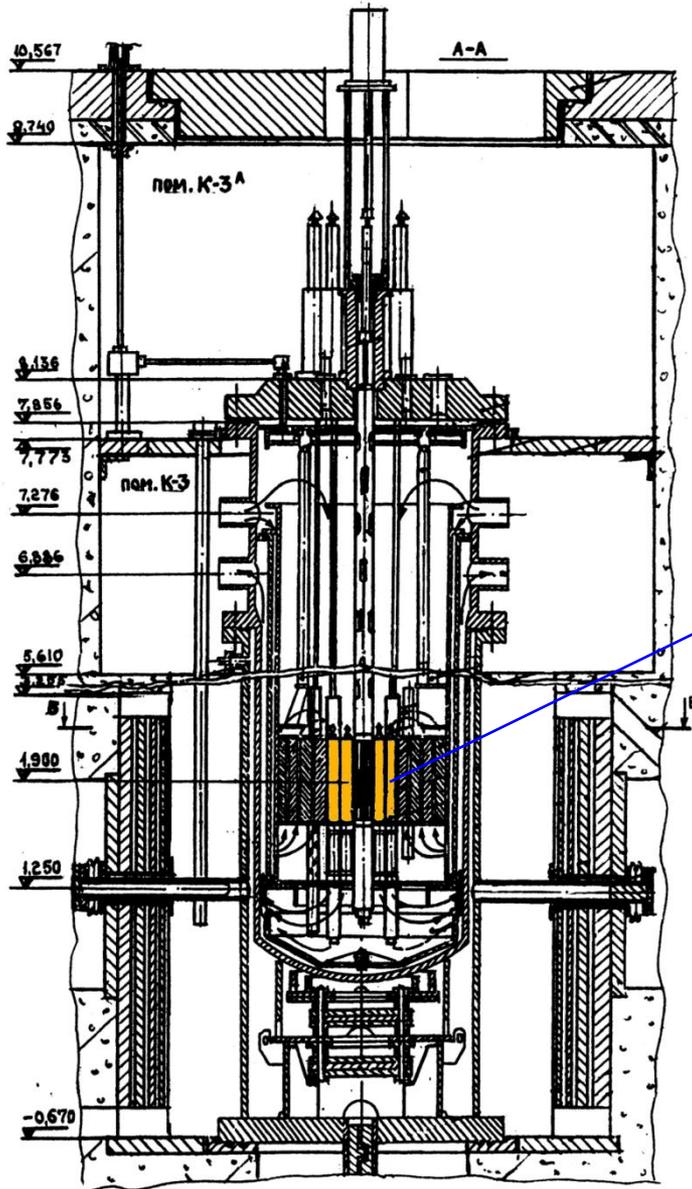
Reactor power 100MW, Size of reactor core  $0.5 \times 0.5 \text{ m}^3$ ,  
minimal distance 5 m, experimental base from 5 m to 15 m



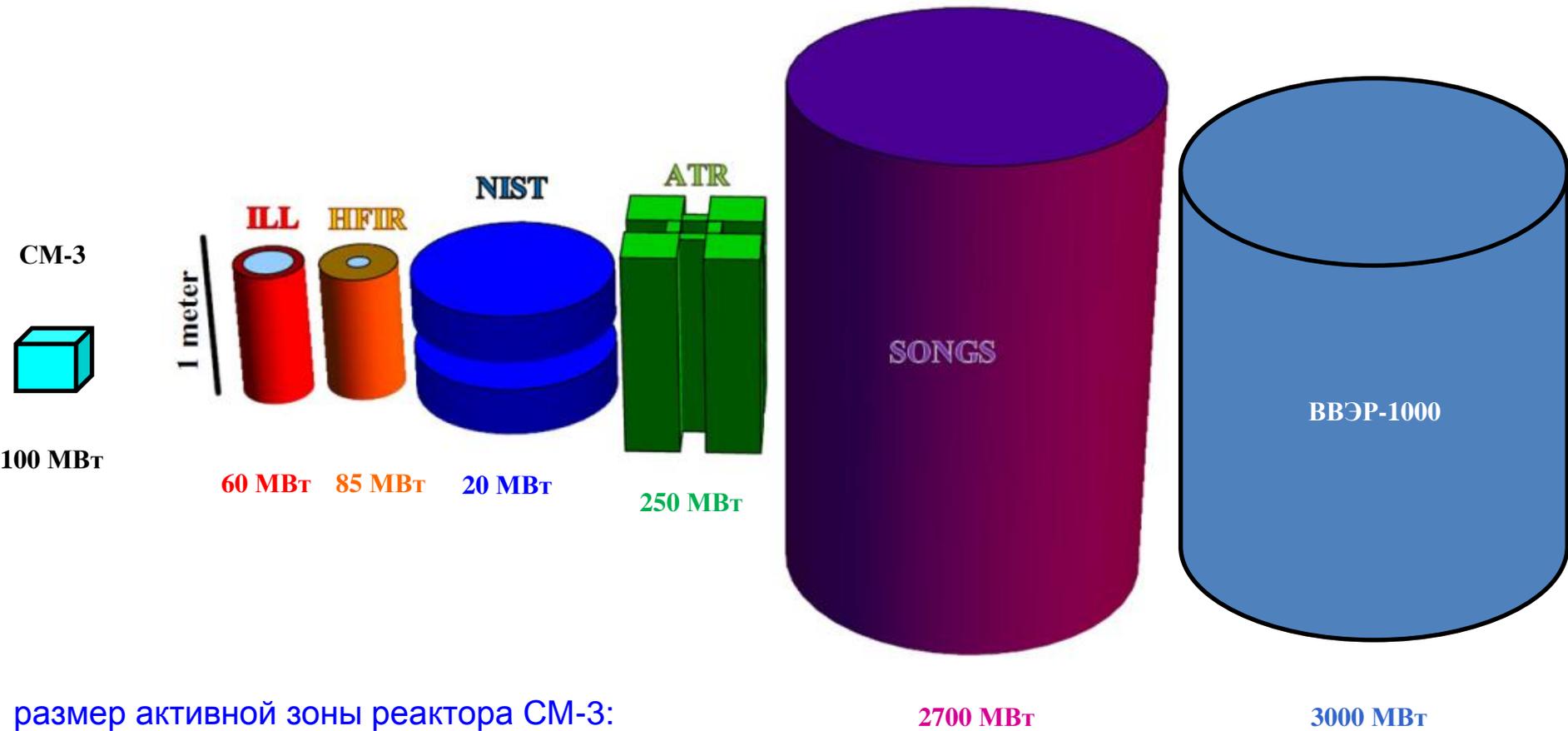
Position of multi-section detector in experimental hall of reactor PIK  
Shielding: 1 – muon veto, 2 – Pb, 3 –  $\text{CH}_2 + \text{B}$ , 4 – scintillator.

# Experimental scheme at SM-3 reactor

Reactor power 100MW, Size of reactor core  $35 \times 42 \times 42 \text{ cm}^3$ ,  
minimal distance 5 m, experimental base from 5 m to 13.5 m



# Размеры активных зон и мощность реакторов



размер активной зоны реактора CM-3:  
42×42×35 см<sup>3</sup>

# Number of expected events per 1m<sup>3</sup> of scintillator for efficiency of registration 50%

	R = 5 m	R = 10 m	Accuracy per 1 year /1m <sup>3</sup>
WWR-M (16 MW) core 0.6x0.7x0.7m <sup>3</sup>	<b>300</b> counts/day·m <sup>3</sup>	<b>75</b> counts/day·m <sup>3</sup>	<b>0.6% - 1.1%</b> (at 5 - 10 m)
SM-3 (100 MW) core 0.35x0.4x0.4 m <sup>3</sup>	<b>1750</b> counts/day·m <sup>3</sup>	<b>435</b> counts/day·m <sup>3</sup>	<b>0.2% - 0.4%</b> (at 5 - 10 m)
PIK(100 MW) core 0.5x0.5x0.5 m <sup>3</sup>	<b>1750</b> counts/day·m <sup>3</sup>	<b>435</b> counts/day·m <sup>3</sup>	<b>0.2% - 0.4%</b> (at 5 - 10 m)

*Эксперимент* **NEUTRINO-4**  
*по поиску стерильного нейтрино*  
*на реакторе ВВР-М*  
*в ПИЯФ*

# *Проблемы фона и преимущество реактора СМ-3*

# Neutron background in reactor hall

	flux of thermal neutrons ( $\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ) (reactor on)	flux of thermal neutrons ( $\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ) (reactor off)
WWR-M (16 MW) core $0.6 \times 0.7 \times 0.7 \text{ m}^3$	<b>2 - 20</b> <b>(<math>\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}</math>)</b>	<b><math>13 \times 10^{-4}</math></b> <b>(<math>\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}</math>)</b>
SM-3 (100 MW) core $0.35 \times 0.4 \times 0.4 \text{ m}^3$	<b><math>5 \times 10^{-4}</math></b> <b>(<math>\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}</math>)</b>	

# Research of conditions for carrying out experiment on reactor WWR-M (May – July 2011)



# Concrete shielding



# Lead shielding – 17 tons with coating from B rubber



# Concrete shielding + Lead shielding



# Installation of the movable detector to measure the distribution of background

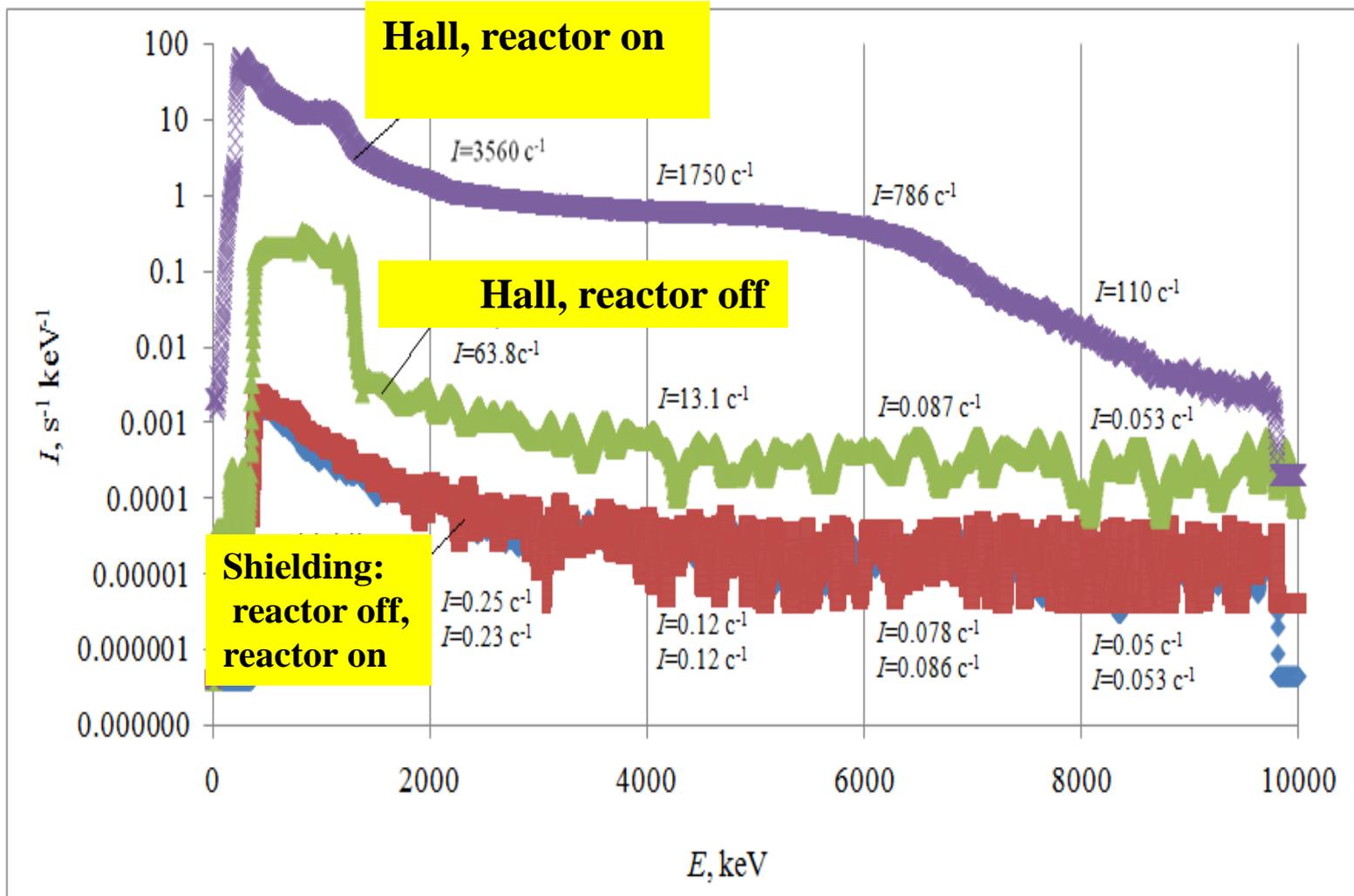


# Concrete shielding + Lead shielding + (CH<sub>2</sub> + B)



# Background of gamma-rays at WWR-M reactor (with shielding, without shielding and reactor on, reactor off)

Shielding factor -  $10^4 - 10^5$



# Neutron background in shielding (CH<sub>2</sub> + B, concrete, Pb +B ) **Shielding factor - 10<sup>4</sup> - 10<sup>5</sup>**

	flux of thermal neutrons (n/cm <sup>2</sup> ·s) (reactor on)	flux of thermal neutrons (n/cm <sup>2</sup> ·s) (reactor off)
WWR-M (16 MW) core 0.6x0.7x0.7m <sup>3</sup>	<b>8.9 × 10<sup>-5</sup></b> neutrons (n/cm <sup>2</sup> ·s) (with shielding)	<b>4.5 × 10<sup>-5</sup></b> neutrons (n/cm <sup>2</sup> ·s) (with shielding)
SM-3 (100 MW) core 0.35x0.4x0.4 m <sup>3</sup>	<b>5 × 10<sup>-4</sup></b> neutrons (n/cm <sup>2</sup> ·s) (without shielding)	

# Принципы построения эксперимента

1. Одновременное измерение осцилляций по расстоянию и энергии.

$$P \sim \sin^2 2\vartheta_{new} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{new}^2 L}{4E_\nu}\right)$$

2. **Метод перемещение детектора** для измерения зависимости от расстояния и наблюдения спектральных изменений.

(проблема – малая статистика, дрейф реактора и детектора)

(преимущество – относительные измерения, калибровка не столь актуальна)

3. **Метод секционирования детектора** для измерения зависимости от расстояния и энергии нейтрино

(проблема – высокая точность калибровки исключительно важна, проблема дрейфа детектора)

(преимущество – высокая статистика, нет проблемы дрейфа реакторной мощности)

4. **Компромисс - Метод перемещение детектора с малым числом секций**

# Experiment of L.A. Mikaelyan at Rovno Atomic Station could be considered as prototype for one section of our detector

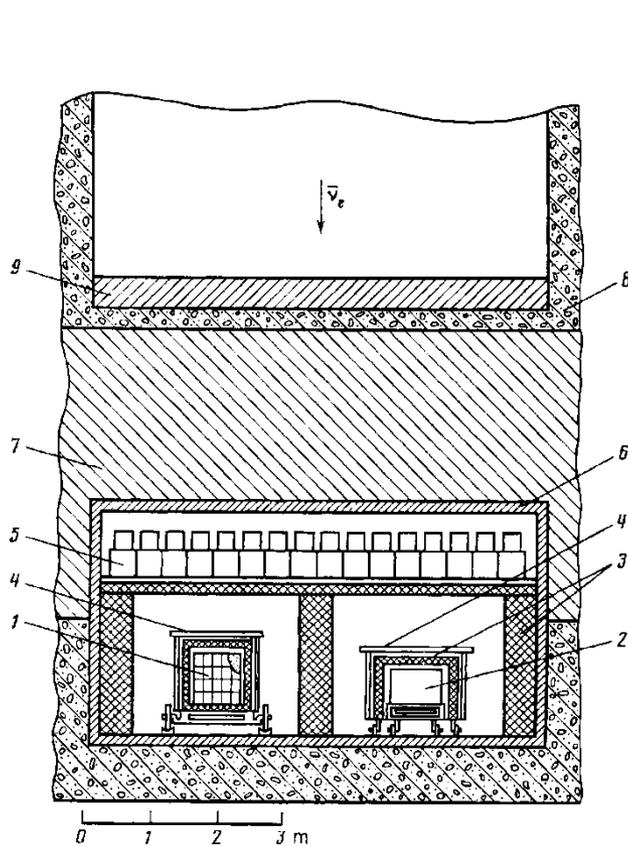
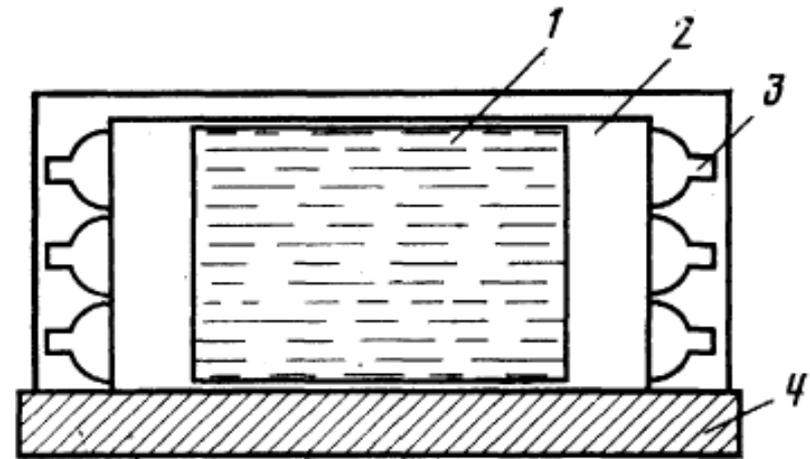
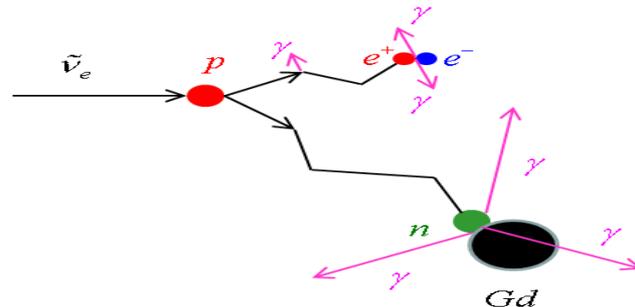
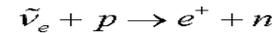


FIG. 1. Schematic diagram of the experimental setup: 1—integrating detector; 2—scintillation-counter spectrometer; 3—polyethylene; 4—scintillators of the anticoincidence shield; 5—tanks containing the liquid scintillator (anticoincidence “hood”); 6—steel; 7—heavy concrete; 8—concrete; 9—additional shielding.



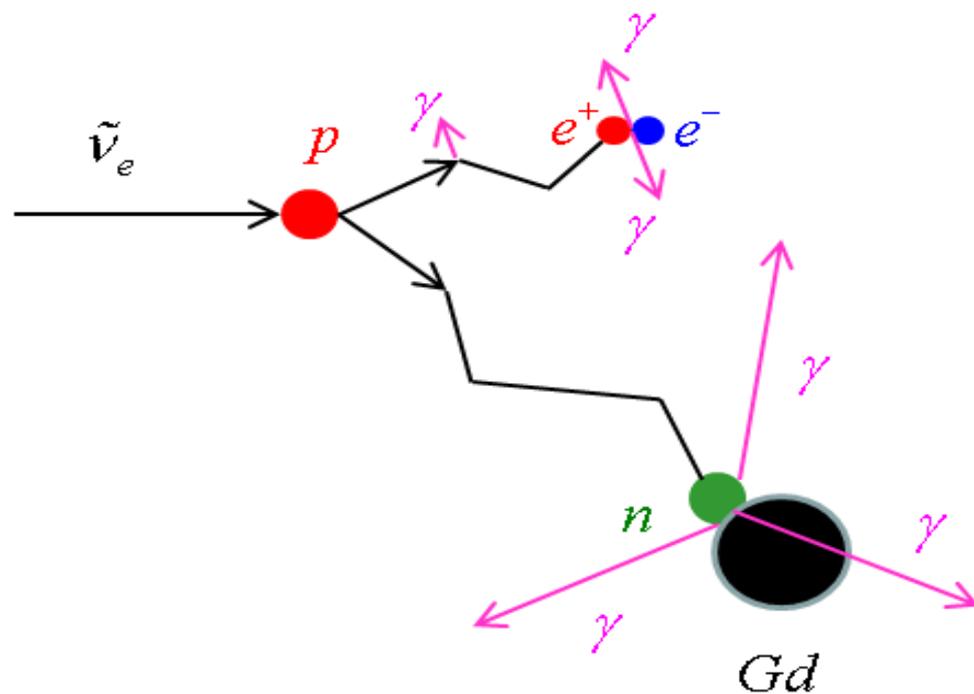
1- liquid scintillator, 2 – lightguide, 3 – FEU-49B,  
4 – borated polyethylene.

## Регистрация антинейтрино

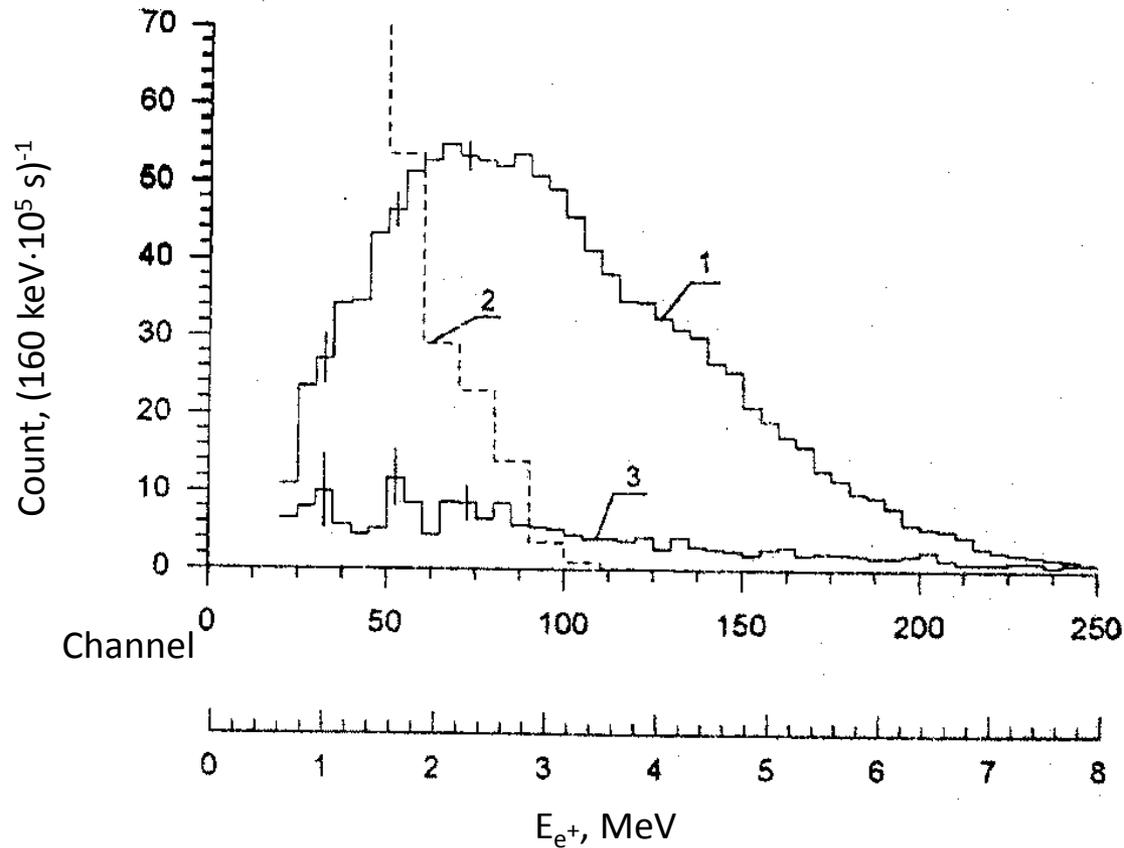


# Регистрация антинейтрино

$$\tilde{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$



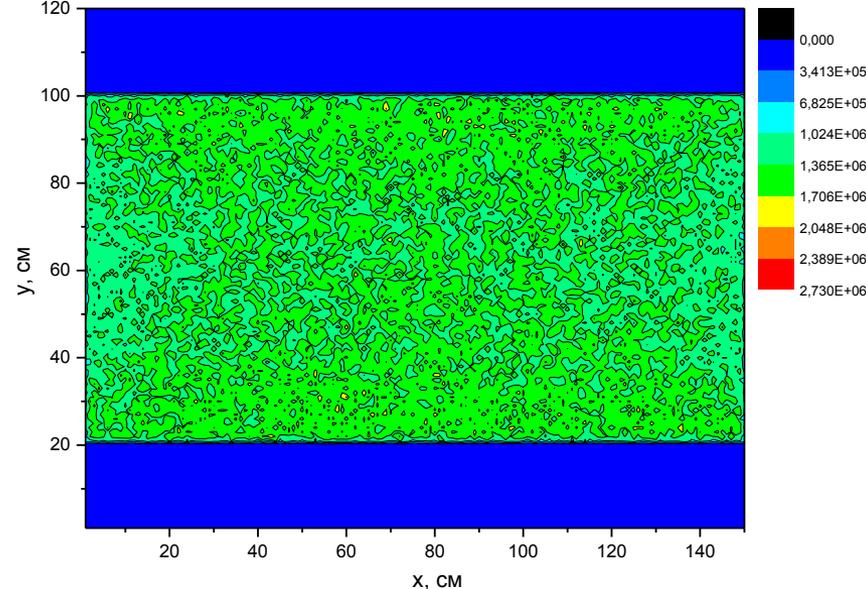
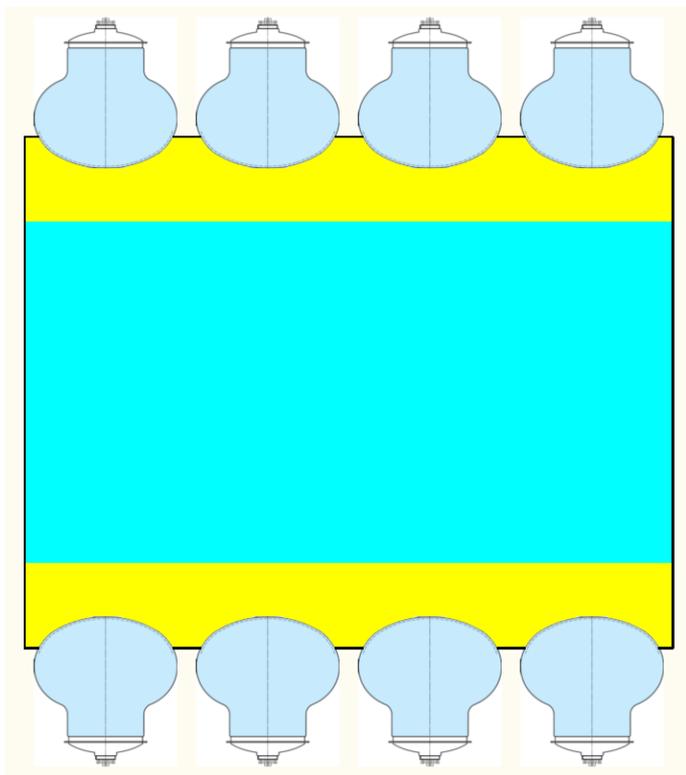
Expected conditions of measurements for single section ~500 l (based on the experiment of L.A.Mikaelyan group at Rovno atomic station)



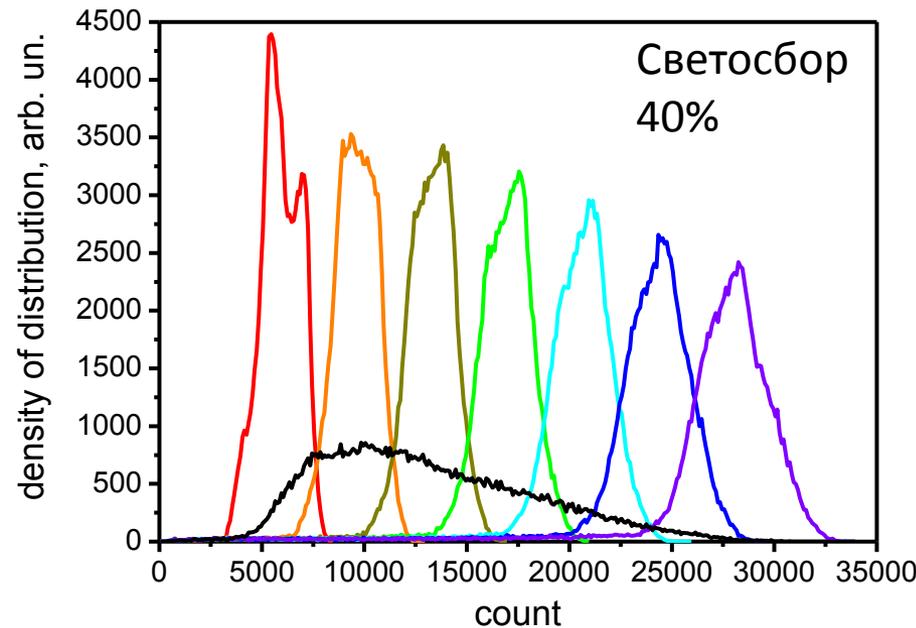
- 1 – neutrino effect + correlated background
- 2 – background of casual events
- 3 – correlated background

*Моделирование детектора и  
выбор оптимальной схемы*

# Scheme with 8 PMT R8055 Hamamat (with the light guide from non-scintillating liquid)

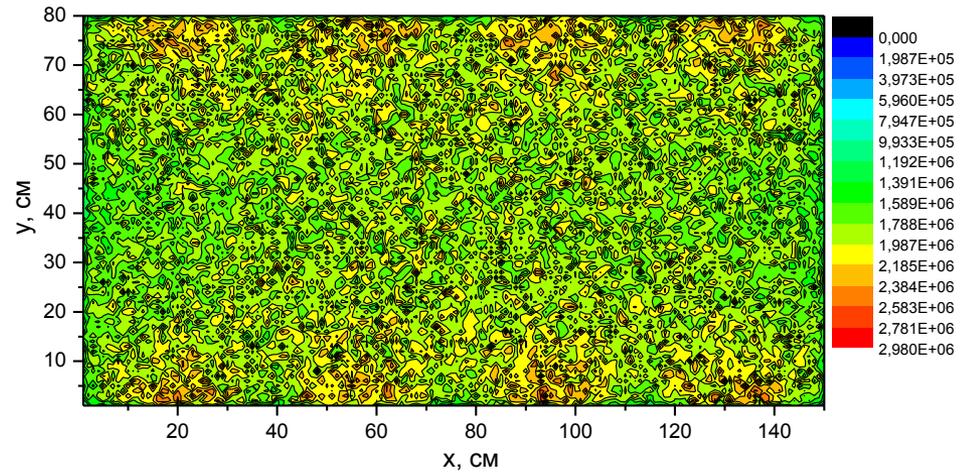
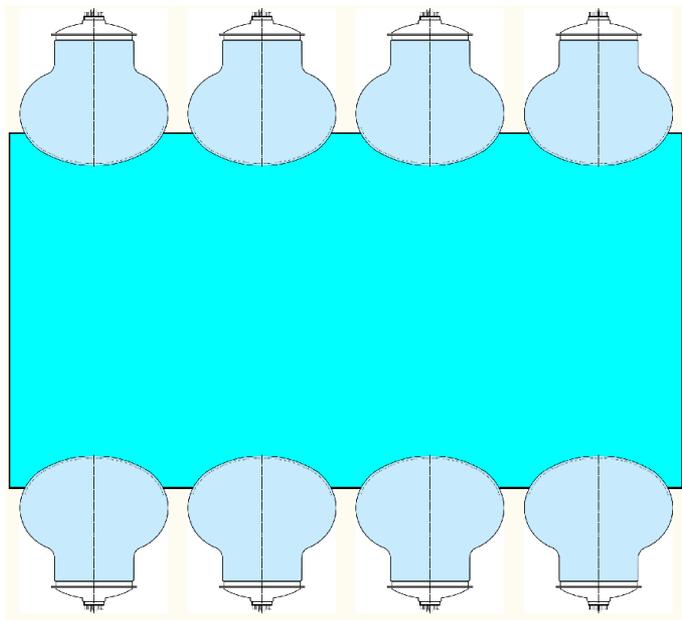


Number of photons reached the PMT depending on the place of positron birth with energy 4 MeV.

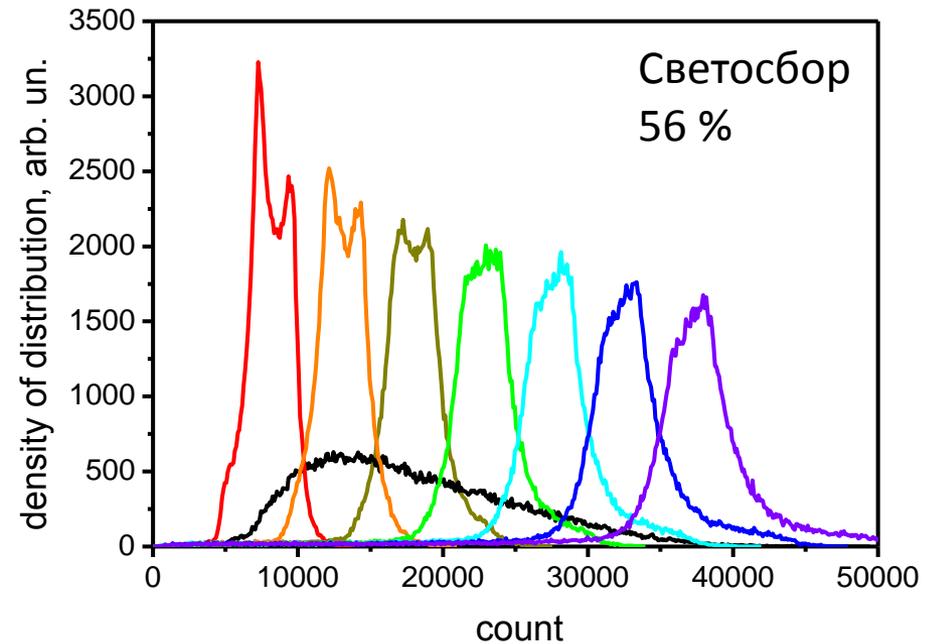


Number of photons reached the PMT. Distributions for positrons with energy from 1 to 7 MeV. Black line is the distribution for positron spectrum.

# Scheme with 8 PMT R8055 Hamamatsu

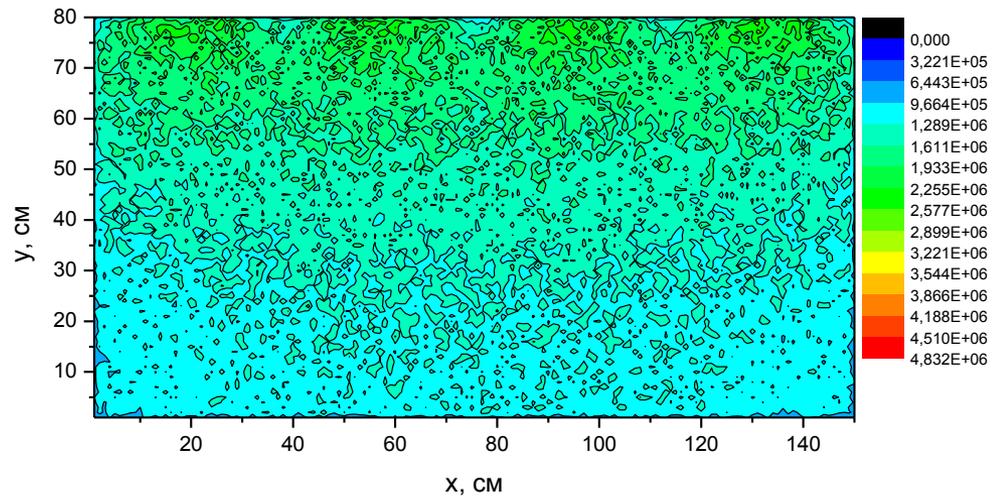
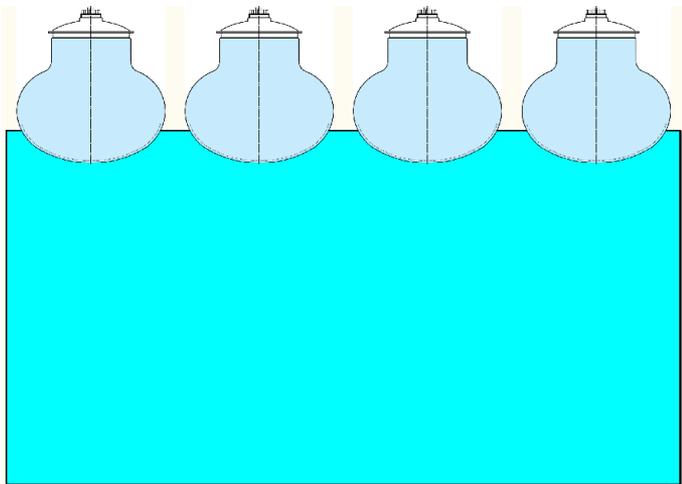


Number of photons counted by PMT depending on the place of positron birth with energy 4 MeV.

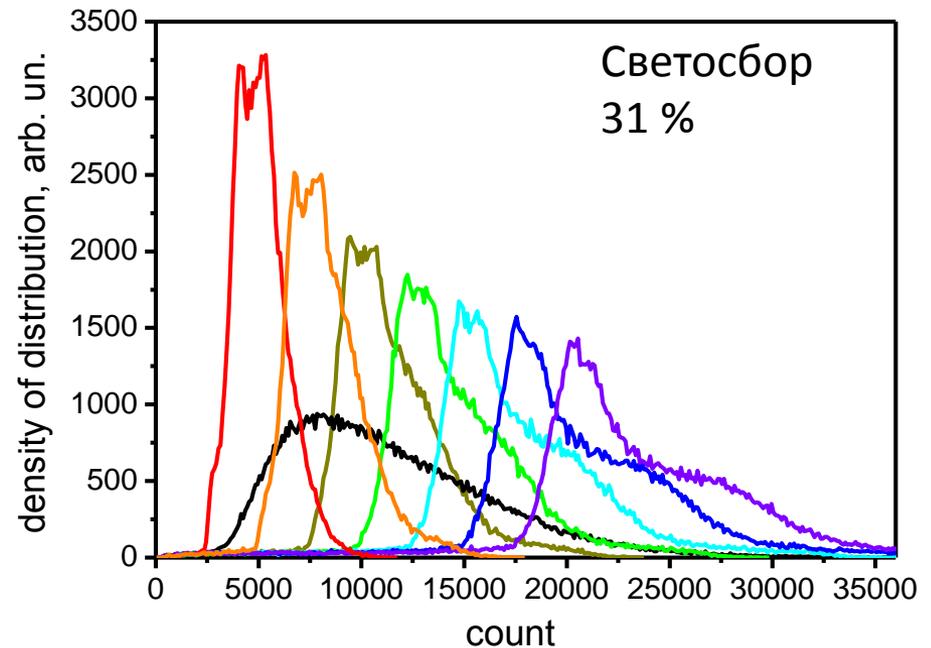


Number of photons counted by PMT distributions from positrons with energy from 1 to 7 MeV. Black line is the distribution for positron spectrum.

# Scheme with 4 PMT R8055 Hamamatsu

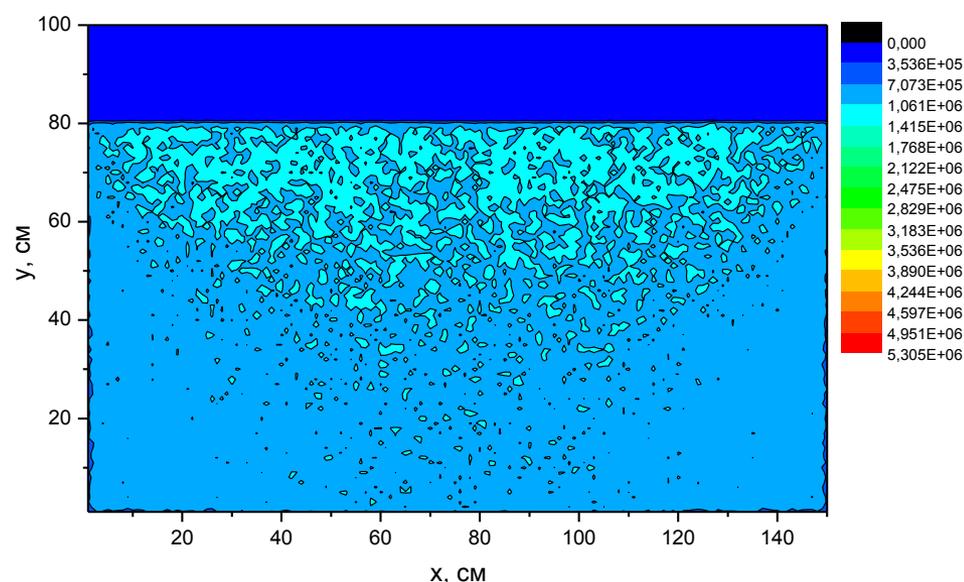
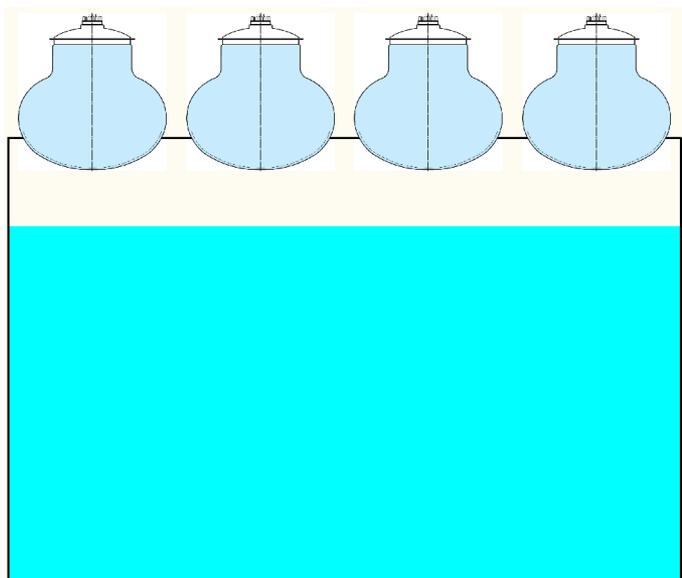


Number of photons counted by PMT depending on the place of positron birth with energy 4 MeV.

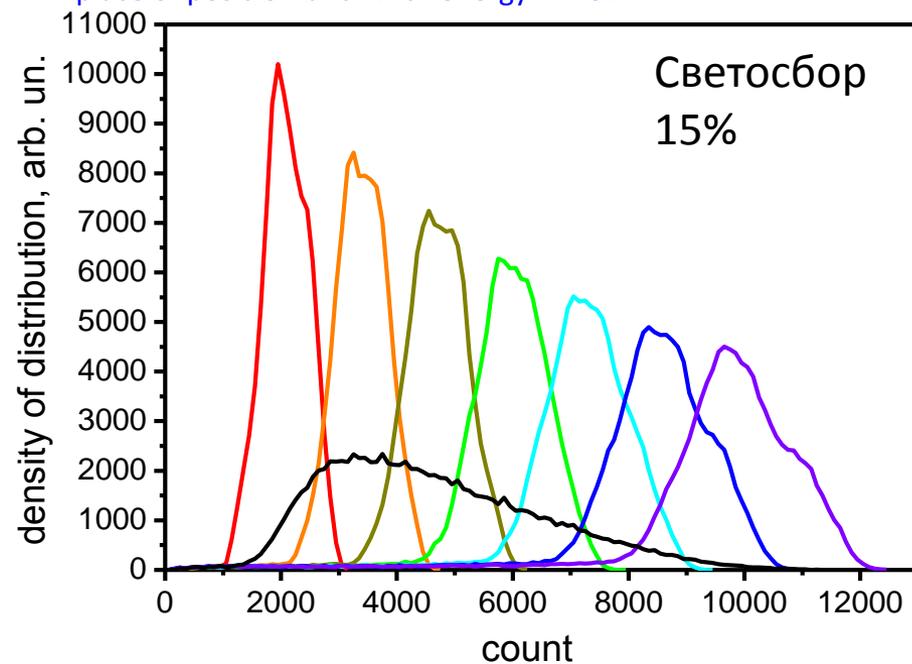


Number of photons counted by PMT distributions from positrons with energy from 1 to 7 MeV. Black line is the distribution for positron spectrum.

# Scheme with 4 PMT R8055 Hamamatsu (with air)



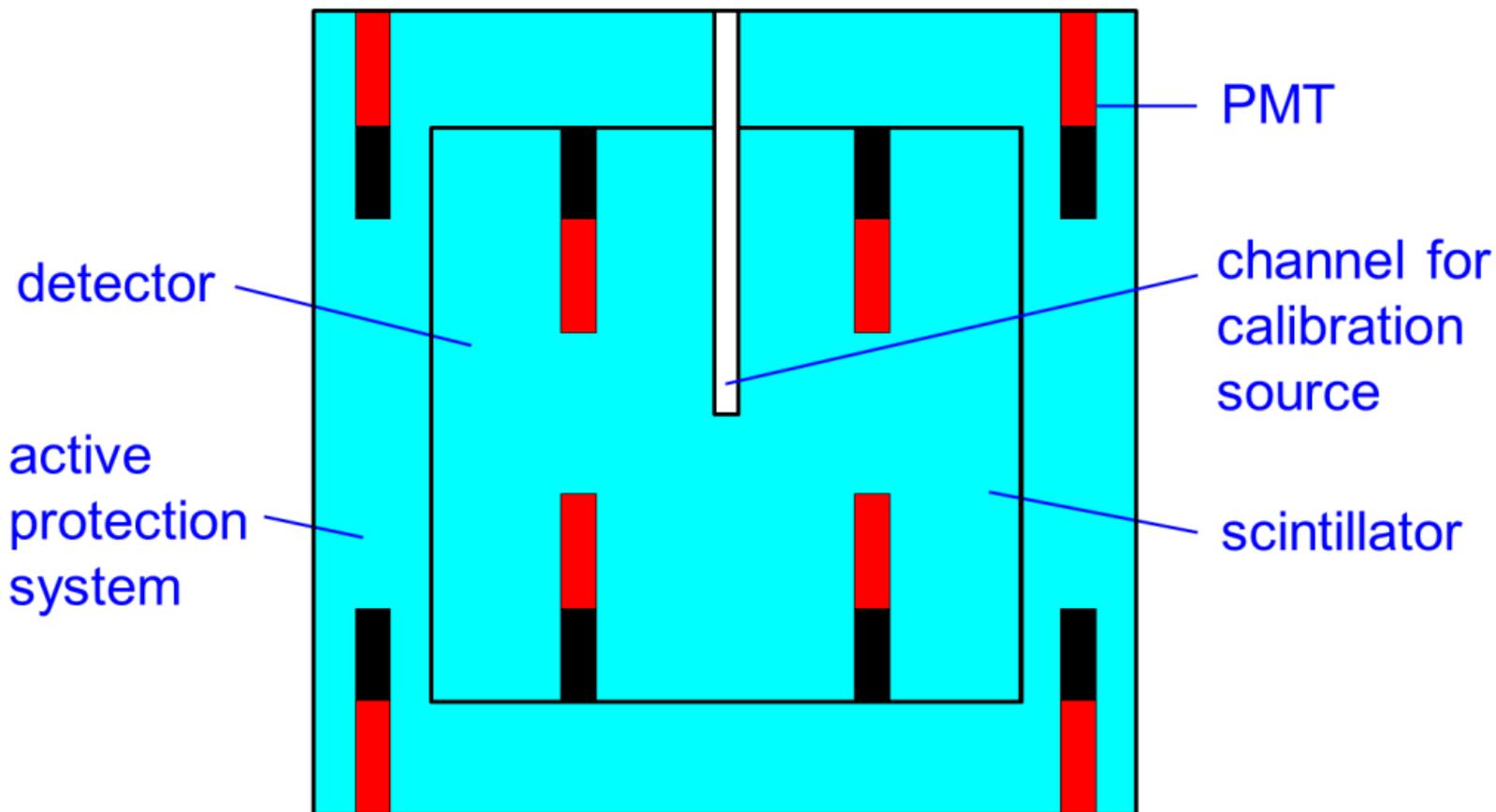
Number of photons counted by PMT depending on the place of positron birth with energy 4 MeV.



Number of photons counted by PMT distributions from positrons with energy from 1 to 7 MeV. Black line is the distribution for positron spectrum.

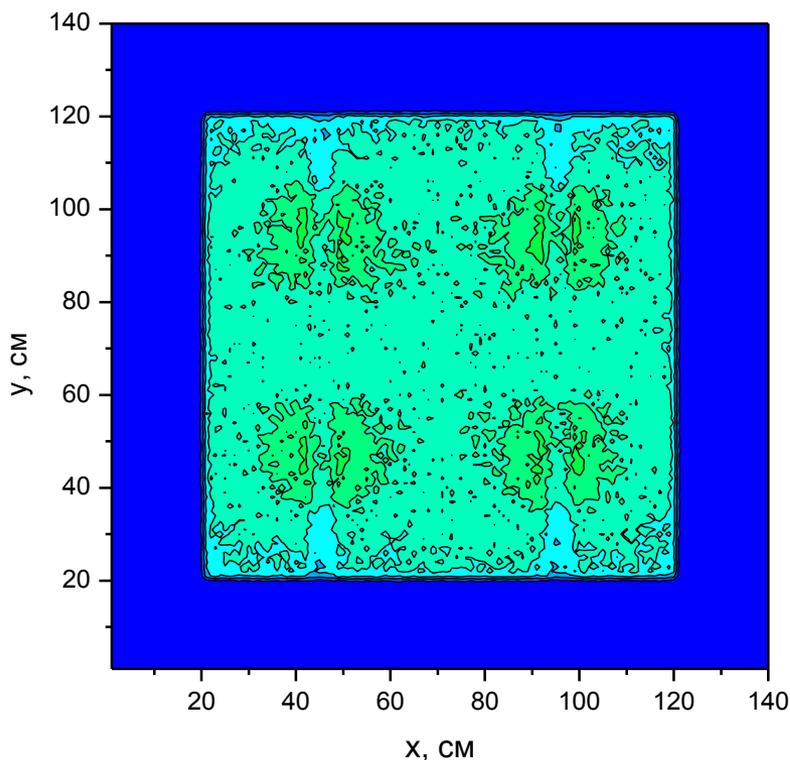
# Scheme with vertical PMT

Светосбор 27 %

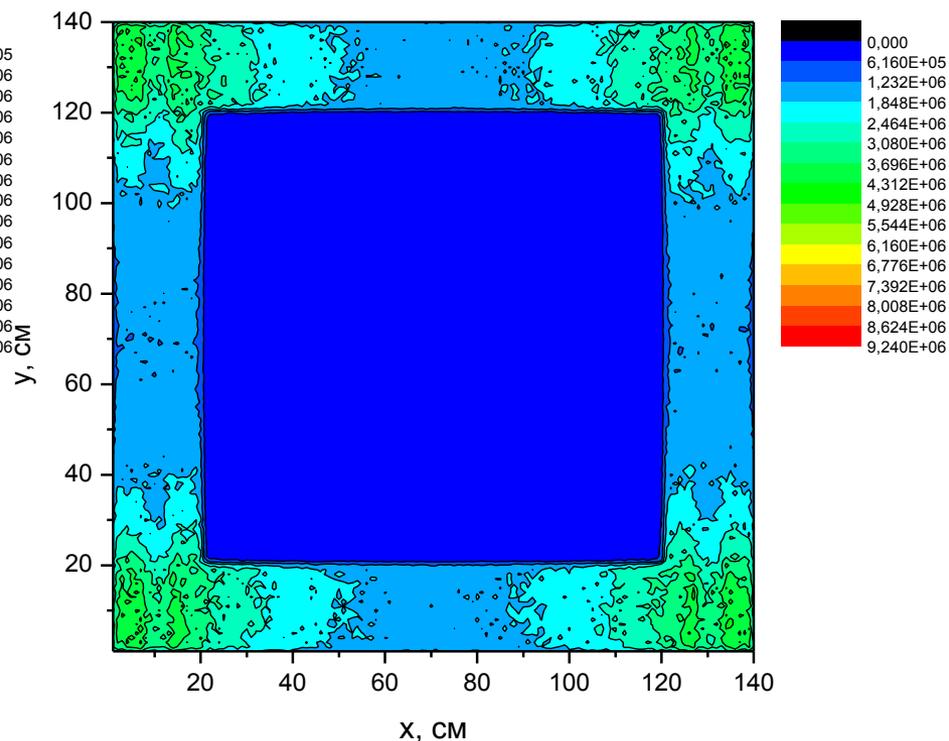


# Scheme with vertical PMT

inside

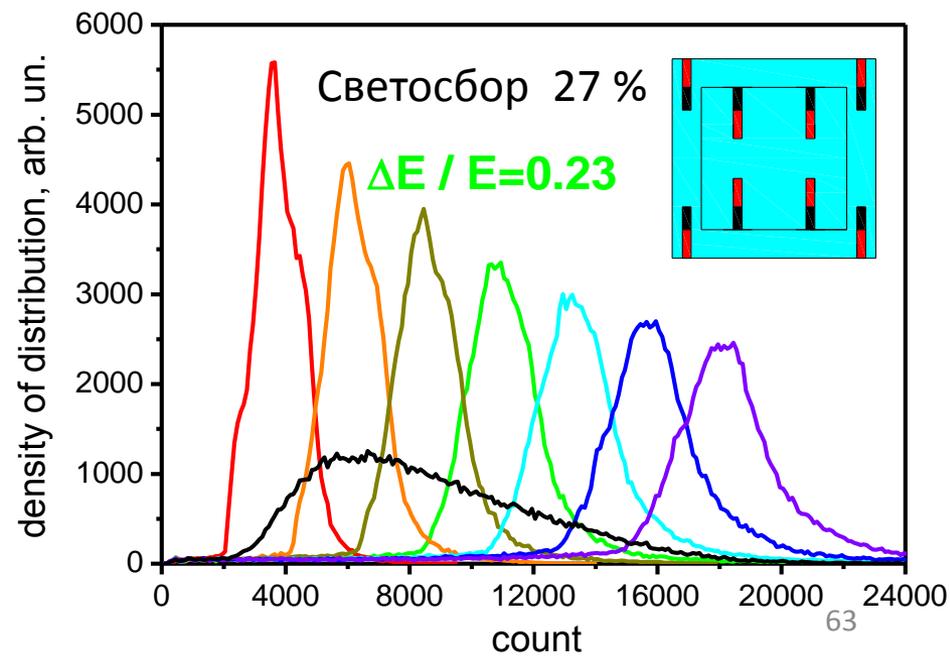
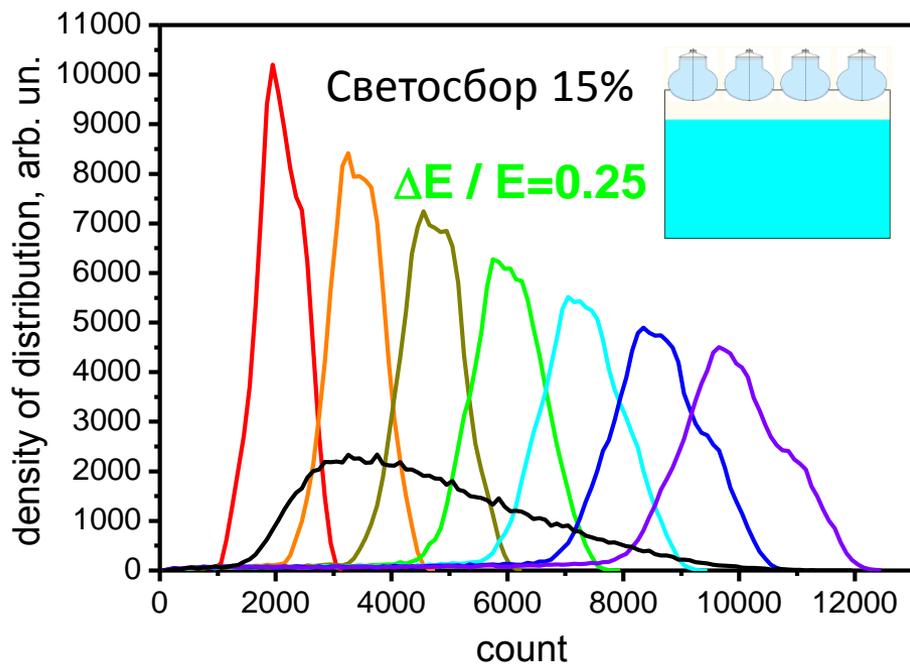
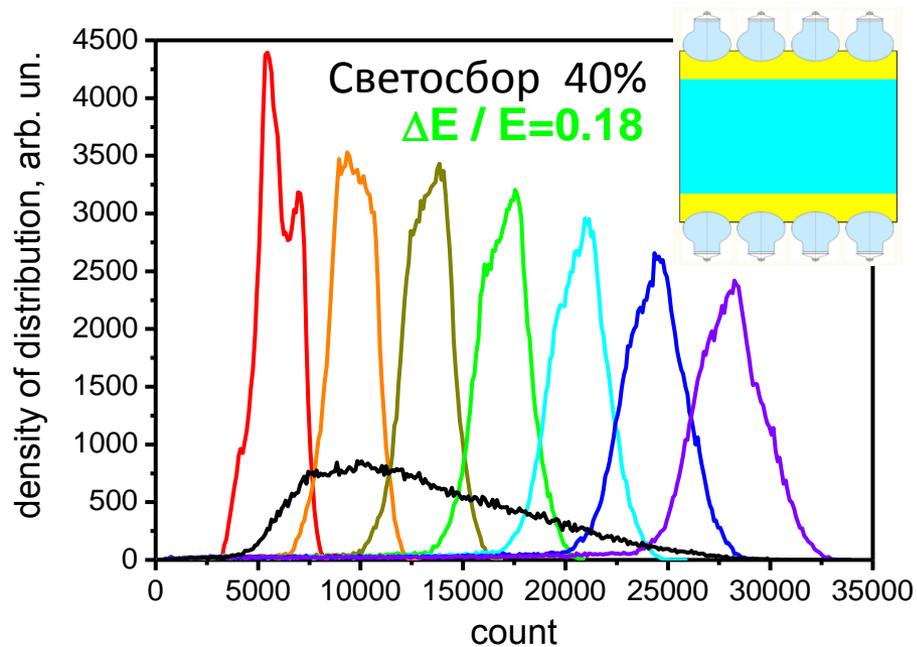


exterior

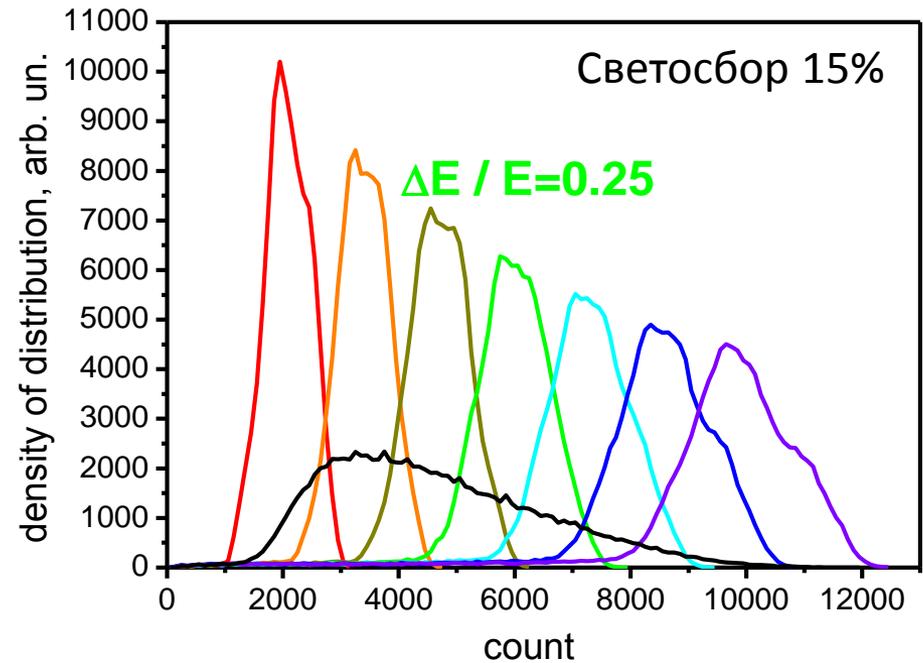
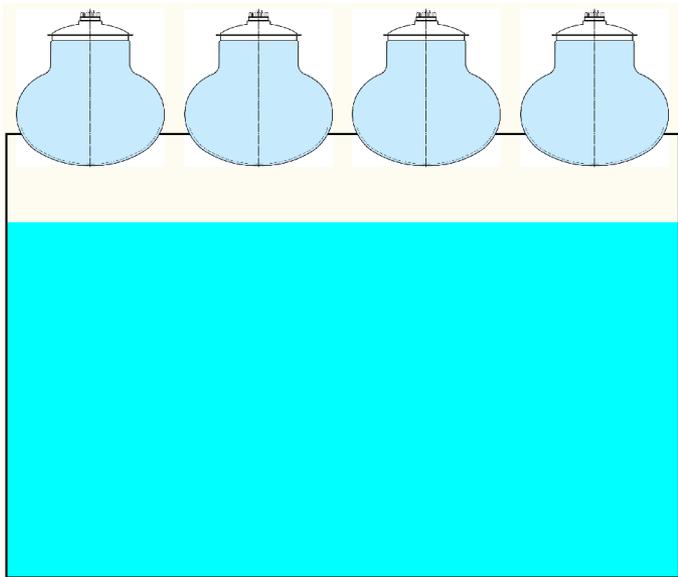


Number of photons reached the PMTs depending on the place of positron with energy 4 MeV was birth

# Comparison of different schemes



# Выбрана схема с ФЭУ над ванной с сцинтилятором и без оптического контакта



Number of photons counted by PMT distributions from positrons with energy from 1 to 7 MeV. Black line is the distribution for positron spectrum.

*Подготовка эксперимента на  
реакторе ВВР-М*

*Бак с  
акриловым  
покрытием*



*ЦЭО ПИЯФ*



# Монтаж отражателя



# *Система перемещения детектора*



# Concrete shielding + Lead shielding + (CH<sub>2</sub> + B)



# *Внешняя антисовпаденческая защита «зонтик» (32 пластины 0.5x0.5x0.12 м<sup>3</sup>)*



*Внешняя активная защита из пластика  
с размерами 0.5 x 0.5 x 0.115 м<sup>3</sup>  
и ФЭУ-49Б*

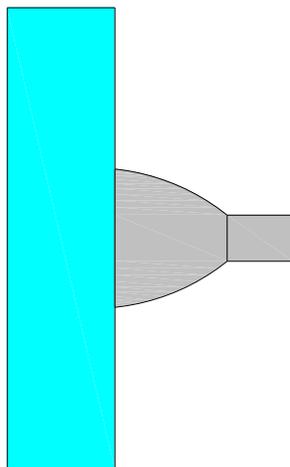
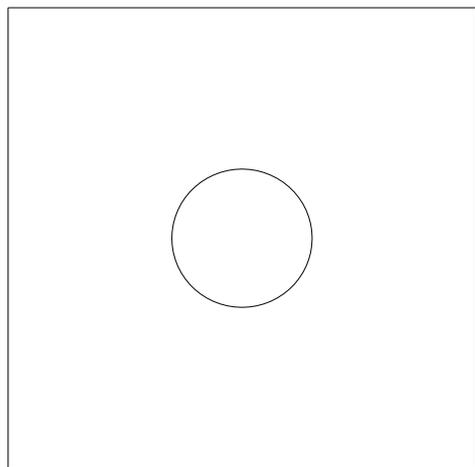
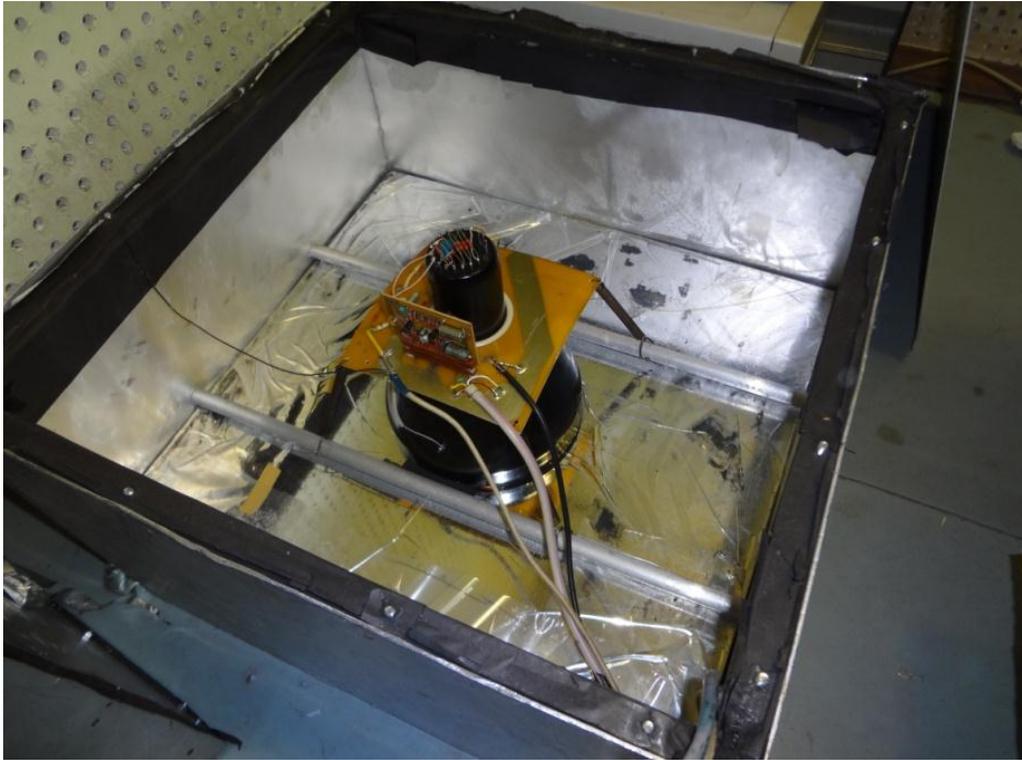


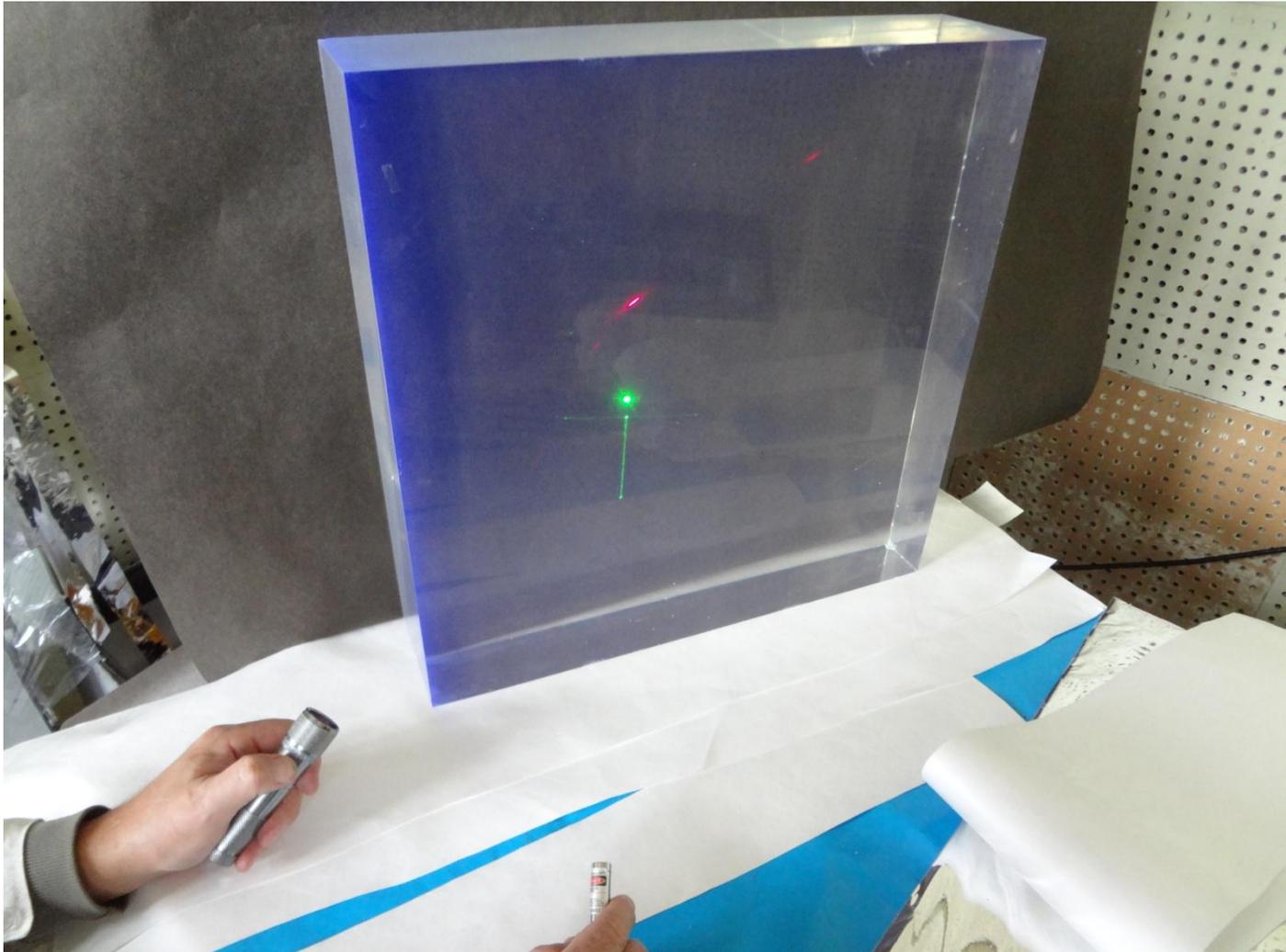
Схема активной защиты

ФЭУ-49Б

# *ФЭУ-49 с пластиковым сцинтилятором 0.5x0.5x0.12 м<sup>3</sup>*



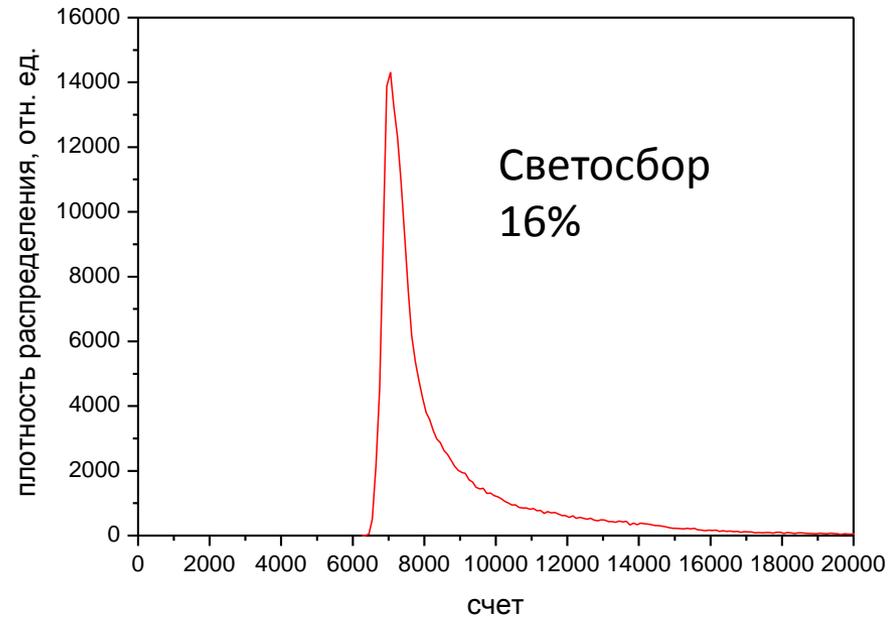
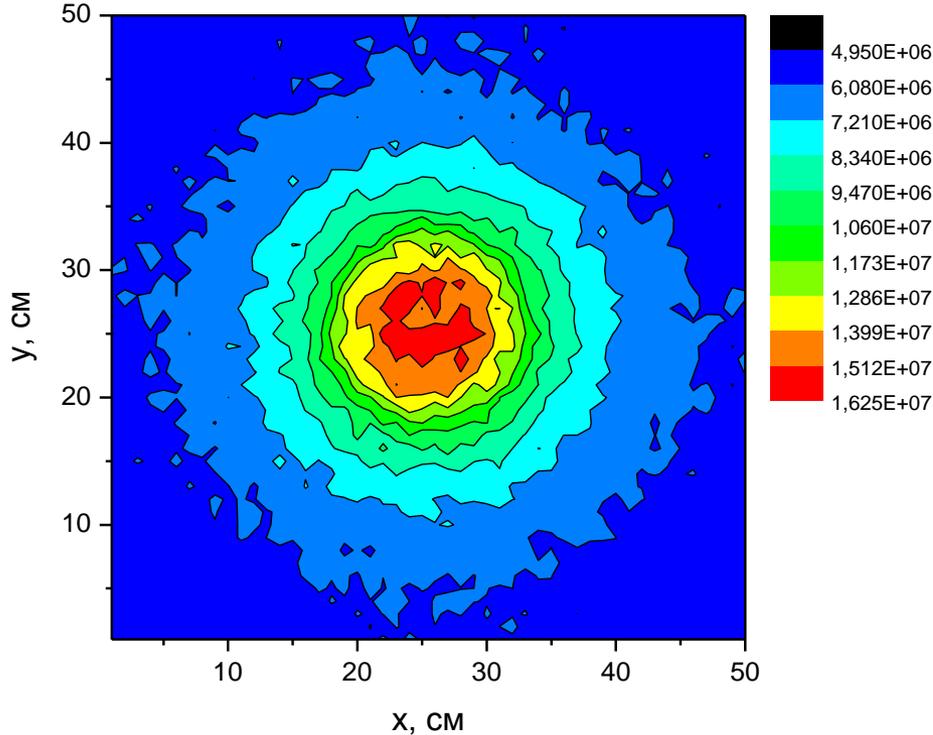
*сцинтилятор 0.5x0.5x0.12 м<sup>3</sup>*



# *Монтаж отражателя*



# Моделирование светосбора



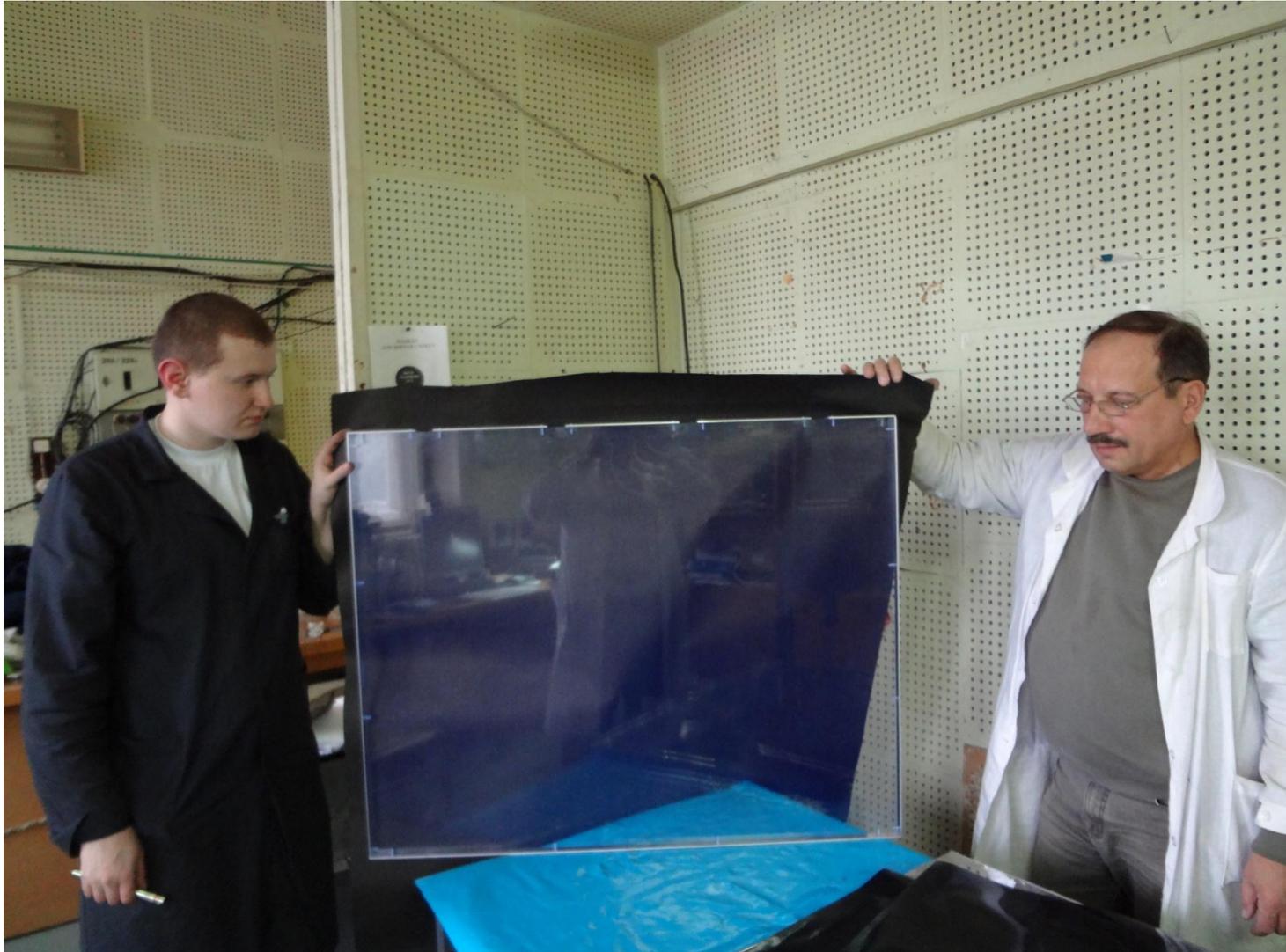
. Счет ФЭУ в зависимости от места точечного события с энергией 5 МэВ.

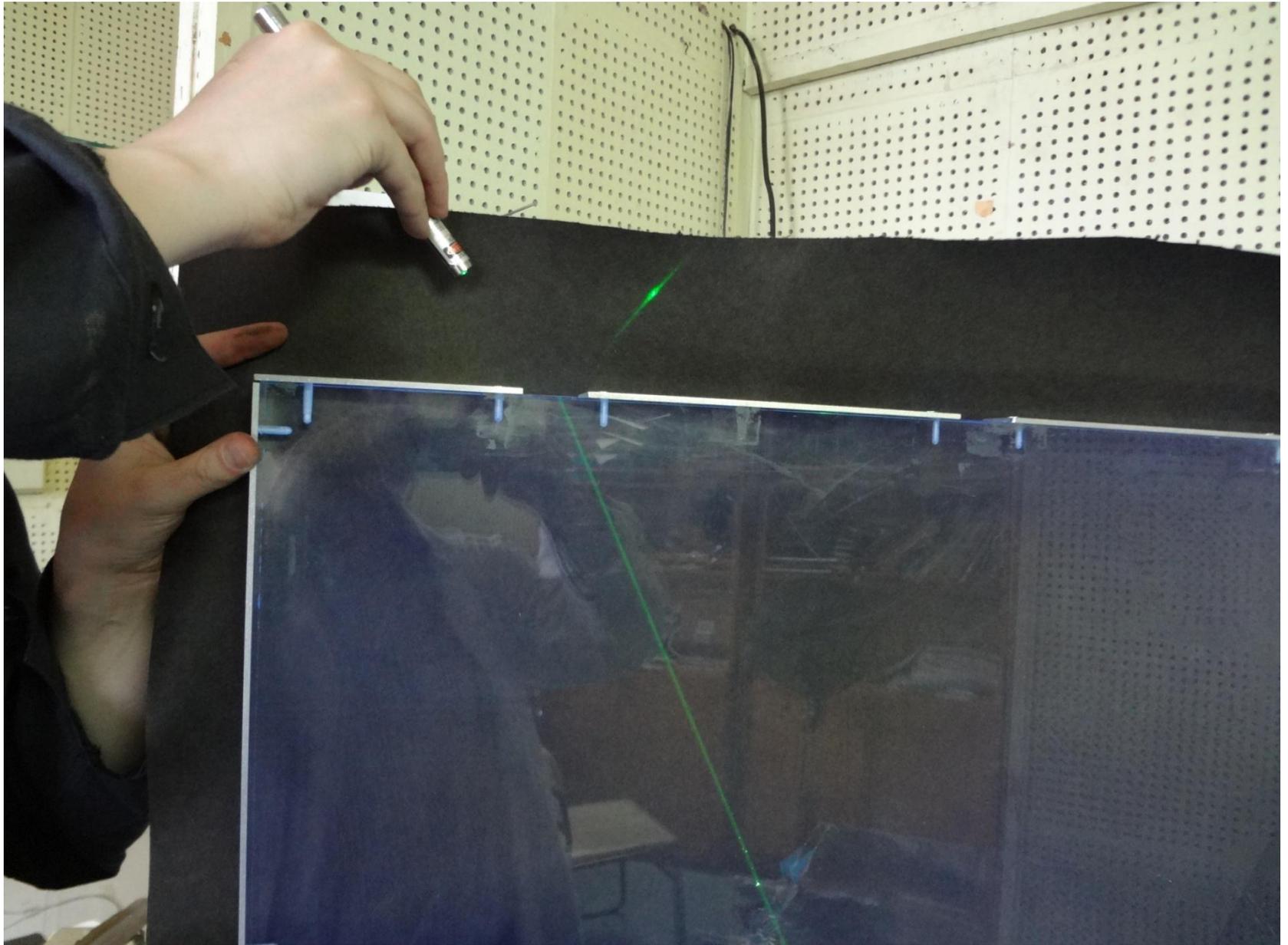
Распределение счета ФЭУ.

*Внутренняя антисовпаденческая защита из  
пластин сцинтилятора 1x1x0.025 м<sup>3</sup>*



*Внутренняя антисовпадeнчeская защита  
из пластин сцинтиллятора 1x1x0.025 м<sup>3</sup>*

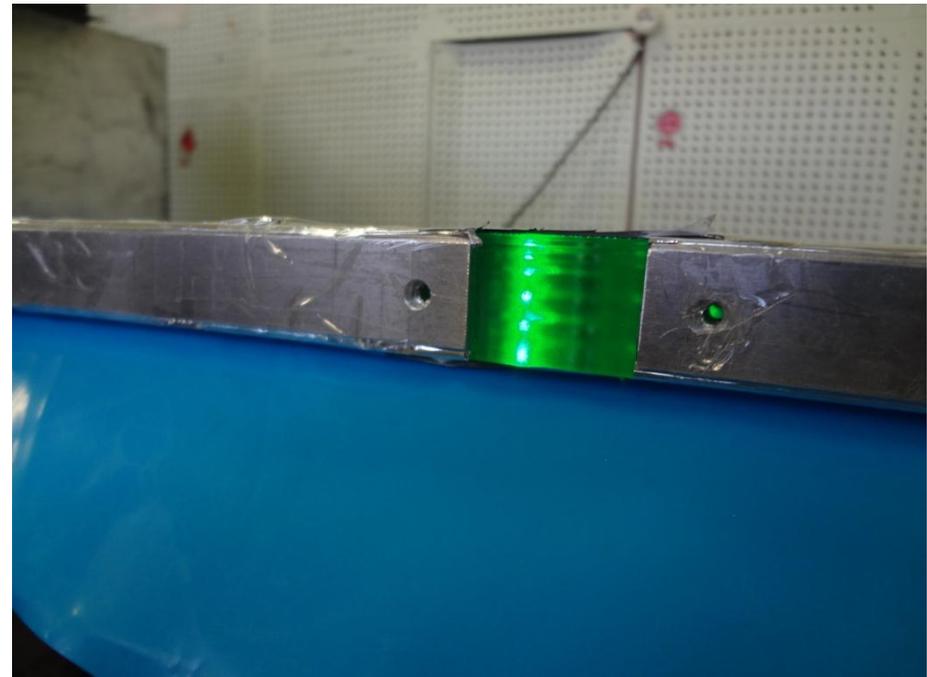
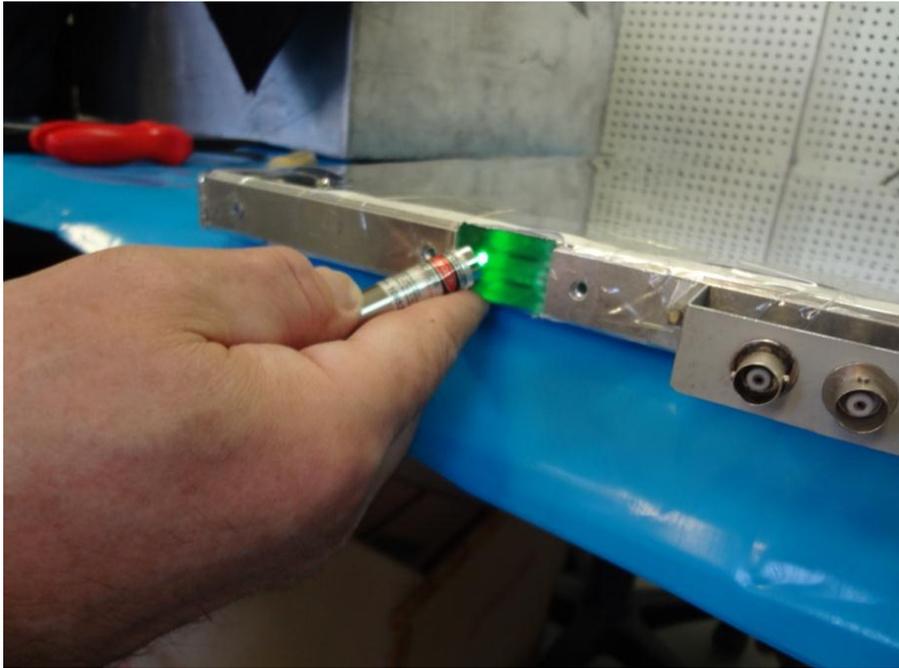




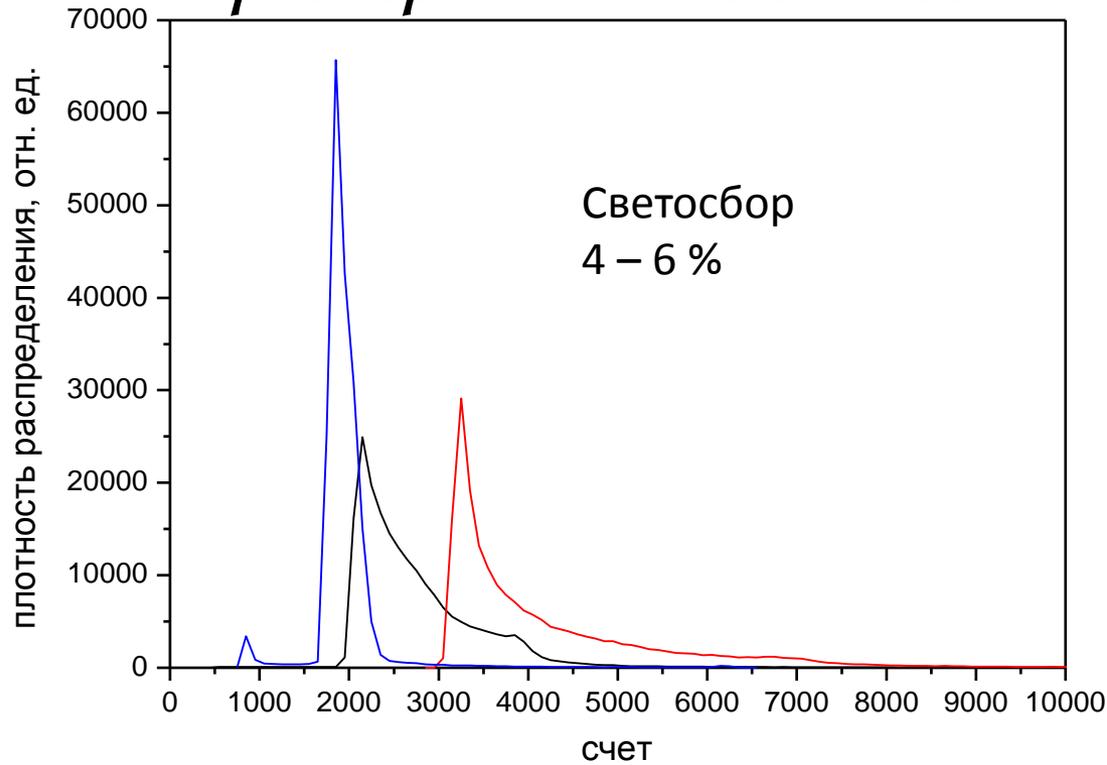
# *Внутренняя антисовпаденческая защита (монтаж с отражателями и с ФЭУ 85)*



# *Эффект полного внутреннего отражения*



# Моделирование активной защиты из пластика с размерами $1.2 \times 0.6 \times 0.05 \text{ м}^3$



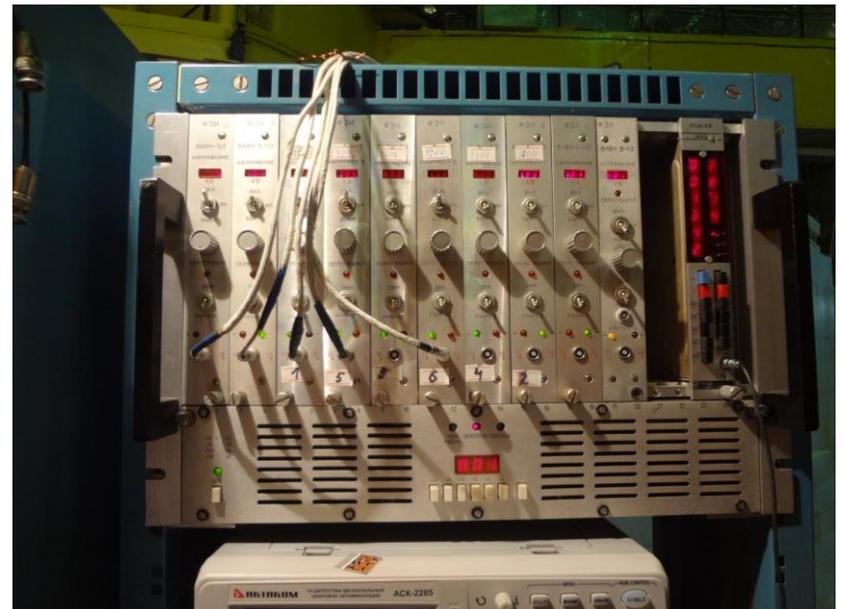
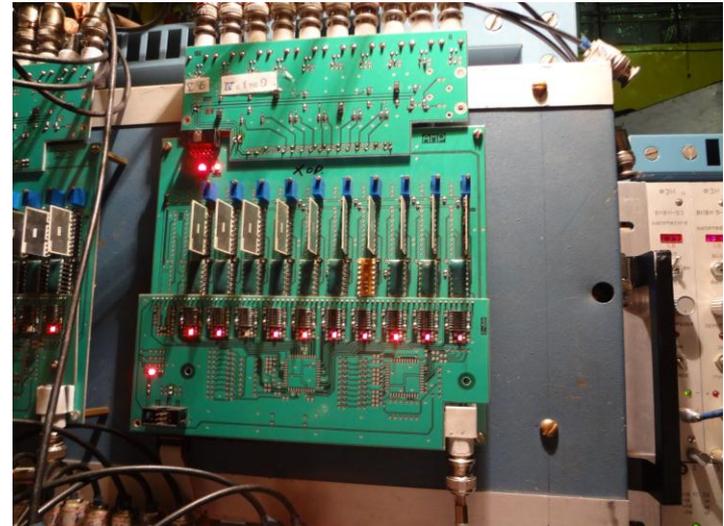
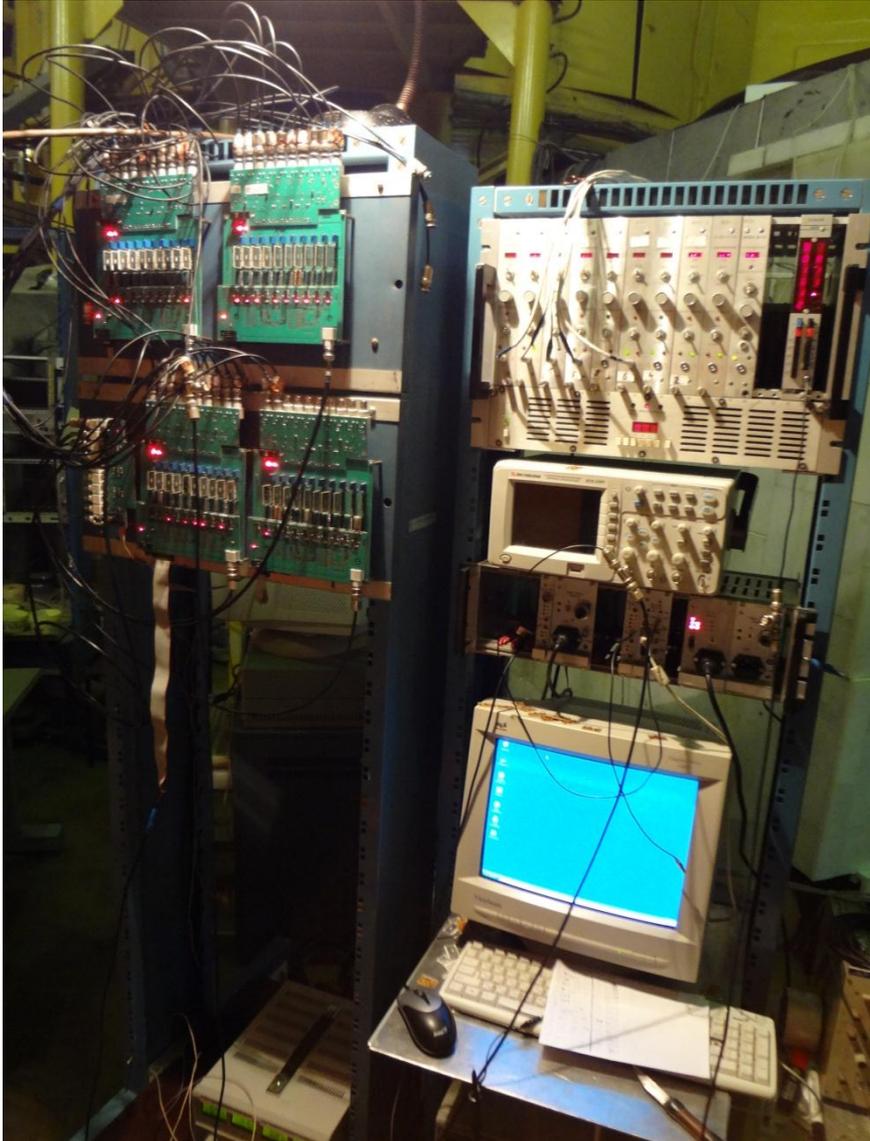
. Распределение суммарного счета ФЭУ:

— оптический контакт сцнтиллятора с ФЭУ, сцнтиллятор обернут белой бумагой;

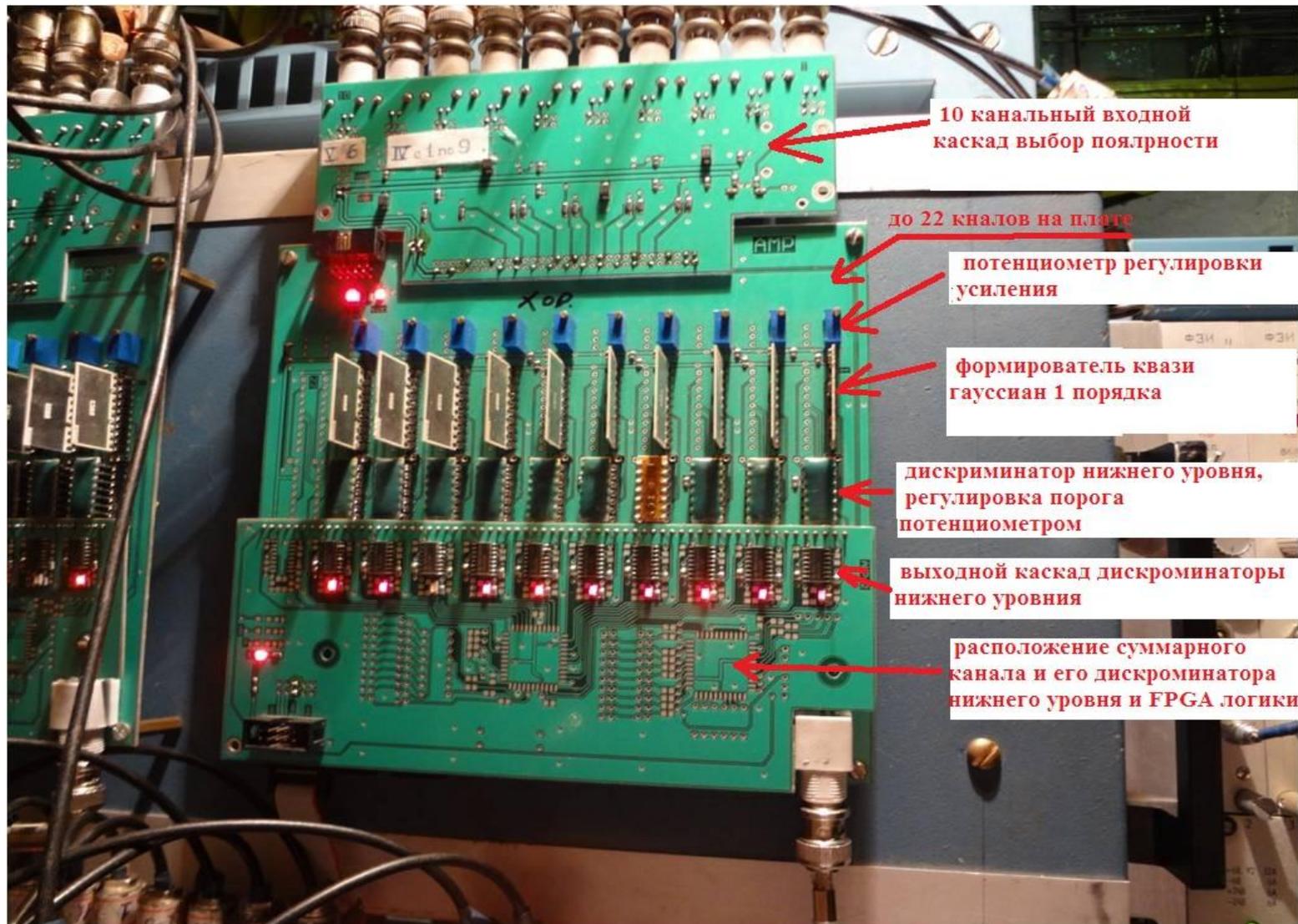
— оптический контакт сцнтиллятора с ФЭУ, сцнтиллятор обернут черной бумагой;

— между ФЭУ и сцнтиллятором воздух, сцнтиллятор обернут белой бумагой.

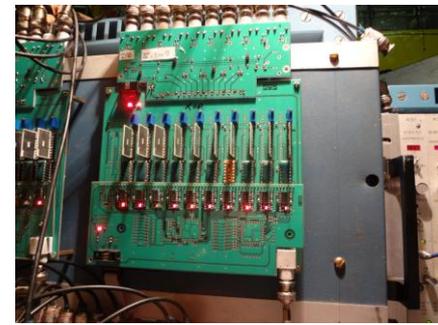
# Электроника



**В настоящее время мы имеем возможность  
скомплектовать до 300 спектрометрических каналов.**



## две печатных платы, которые вмещают по 22 канала



Конструктивно каналы расположены на двух печатных платах, которые вмещают по 22 канала. На одной плате, которая может находиться в непосредственной близости от детектора (ФЭУ, ППД и др.), располагаются 22 зарядовочувствительных предусилителя. Эта плата через длинный шлейф (до 6 метров, чтобы выйти за габариты активной и пассивной защиты) соединяется со второй платой, которая представлена выше на рисунке.

На этой плате размещены усилитель, дискриминатор, линейный клапан и система определения координаты срабатывания.

Каждый канал имеет индивидуальную регулировку усиления и порога срабатывания – управление идет вручную потенциометром.

Каждый канал имеет выход амплитудного аналогового сигнала для записи спектра и выход логического сигнала в стандарте TTL для последующего использования .

Также плата имеет суммарный амплитудный со всех 22 каналов и дискриминатор нижнего уровня.

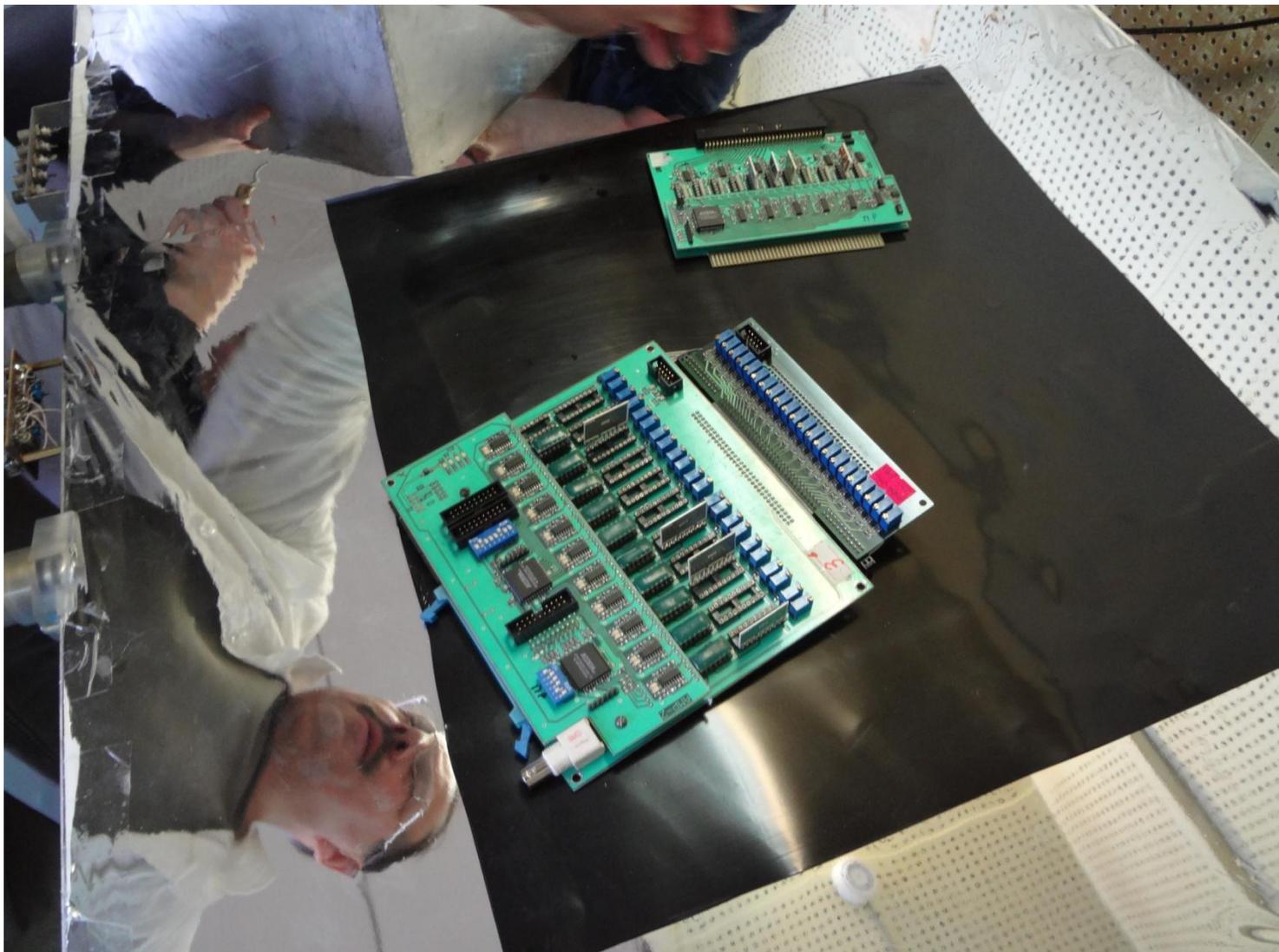
Такие платы могут объединяться в систему с измерением амплитуды, времени и координаты детектора.

# Система высоковольтного питания – напряжение для ФЭУ Крейт КАМАК. Каждый высоковольтник до 3кВ, то до 5мА.

10 высоковольтных источников питания. КАМАК крейт.  
каждый высоковольтник до 3кВ, то до 5мА



# *Электроника*



# *Электроника*



# Модернизированная система из Гренобля при регистрации по методу “КИНО”:

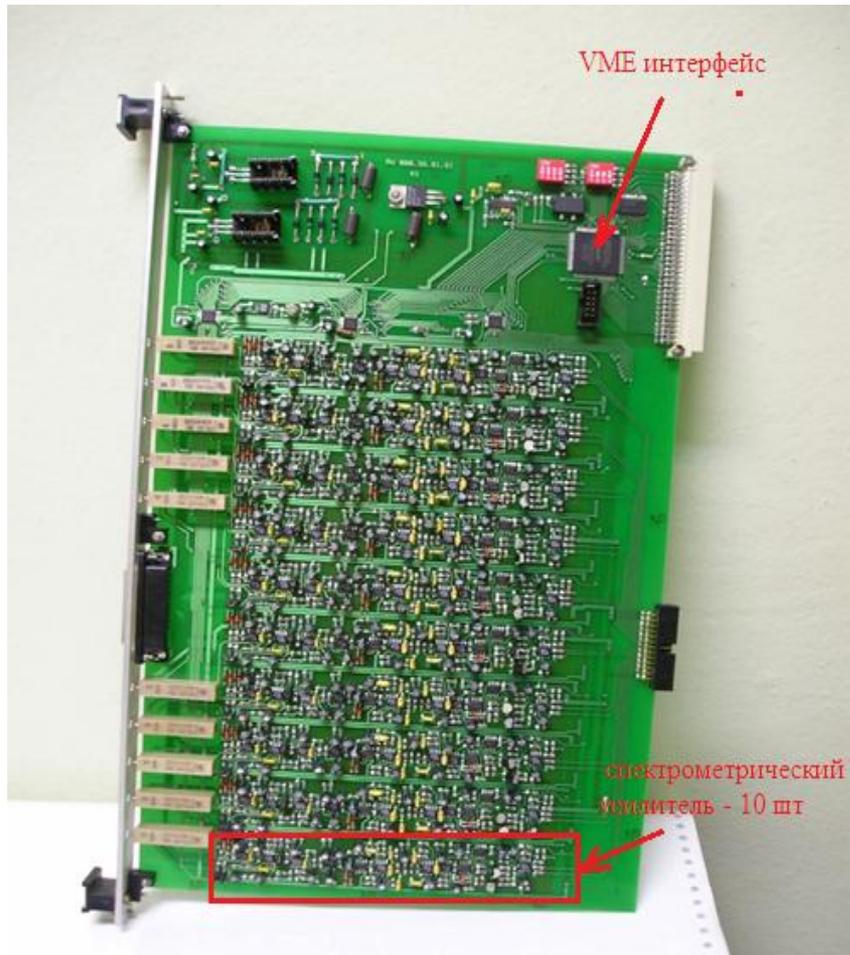


Состоит из двух типов модулей ( всего 12+12)

# Модернизированная система при регистрации по методу “КИНО”:

- промышленный компьютер модели iROBO-2000-40Q5TRHN
- высокоскоростной интерфейс PCI-VME фирмы NI модели VME-PCI8000 для считывания данных из VME 9U крейта в котором расположены 12 модулей обработки сигналов RV000.42. Всего 12 каналов регистрации амплитуда+время и 96 каналов регистрации – амплитудные ворота + время.
- PCI-VME интерфейс для управления VME 9U крейтом в котором расположены 12 модулей RV000.39. Всего 120 спектрометрических трактов (12 запасных)  
Испытательный стенд VME крейт 9U в котором расположено по одному модулю RV000.42 и RV000.39.

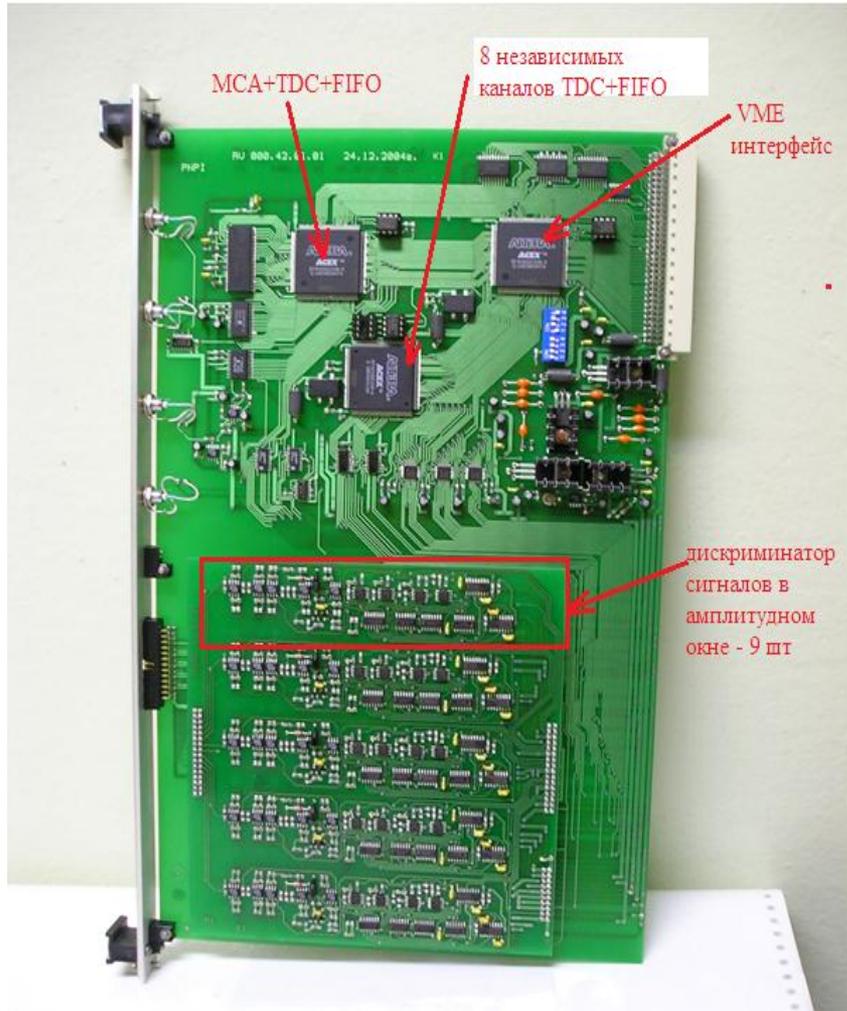
# Модуль спектрометрического 10 канального усилителя



Каждый канал состоит из:

- входной дифференцирующий каскад с регулировкой полюса ноль
- переключателя полярности сигнала
- усилительного каскада с регулировкой коэффициента усиления 1-100 через VME шину
- формирователя квазигауссиан 6 порядка
- стробируемого восстановителя базовой линии, порог срабатывания дискриминатора управляется через шину VME
- выходного каскада

# Модуль обработки сигналов RV000.42 – 8 независимых каналов TDC+FIFO и 1 каналный МСА+ТДС+FIFO (2004 год производства)



## Канал ТДС

Включает в себя – дискриминатор в окне (совместная работа дискриминатора нижнего и верхнего уровня), многостоповый преобразователь Время-код, FIFO память - для хранения данных о времени. Пороги срабатывания дискриминаторов управляются через VME шину и контролируются по амплитудному спектру встроенным многоканальным анализатором. Данные из FIFO считываются через VME шину

МСА+ТДС – включает в себя многоканальный амплитудный анализатор многостоповый преобразователь Время-код, FIFO память - для хранения данных о времени и амплитуде событий. Данные из FIFO считываются через VME шину

*Определение чувствительности  
эксперимента*

# *Определение чувствительности эксперимента по поиску*

## *стерильного нейтрино на реакторе ВВР-М*

(такую задачу мы не ставим, но тем не менее)

Чувствительность определялась для детектора  $0.9 \times 0.5 \times 0.9 \text{ м}^3$ , расположенного на расстоянии 5 м от активной зоны реактора ВВР-М. Детектор состоит из 2 секций длиной 0.45 м. Расчет проведен для измерений с 2 положениями детектора на расстоянии 5 м и 5.9 м от активной зоны.

## *Определение чувствительности эксперимента по поиску стерильного нейтрино на реакторе ВВР-М*

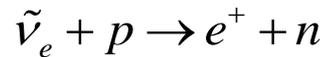
Процесс осцилляций описывается уравнением

$$P(\tilde{\nu}_e \rightarrow \tilde{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{эВ}^2] L [\text{м}]}{E_{\tilde{\nu}} [\text{МэВ}]} \right)$$

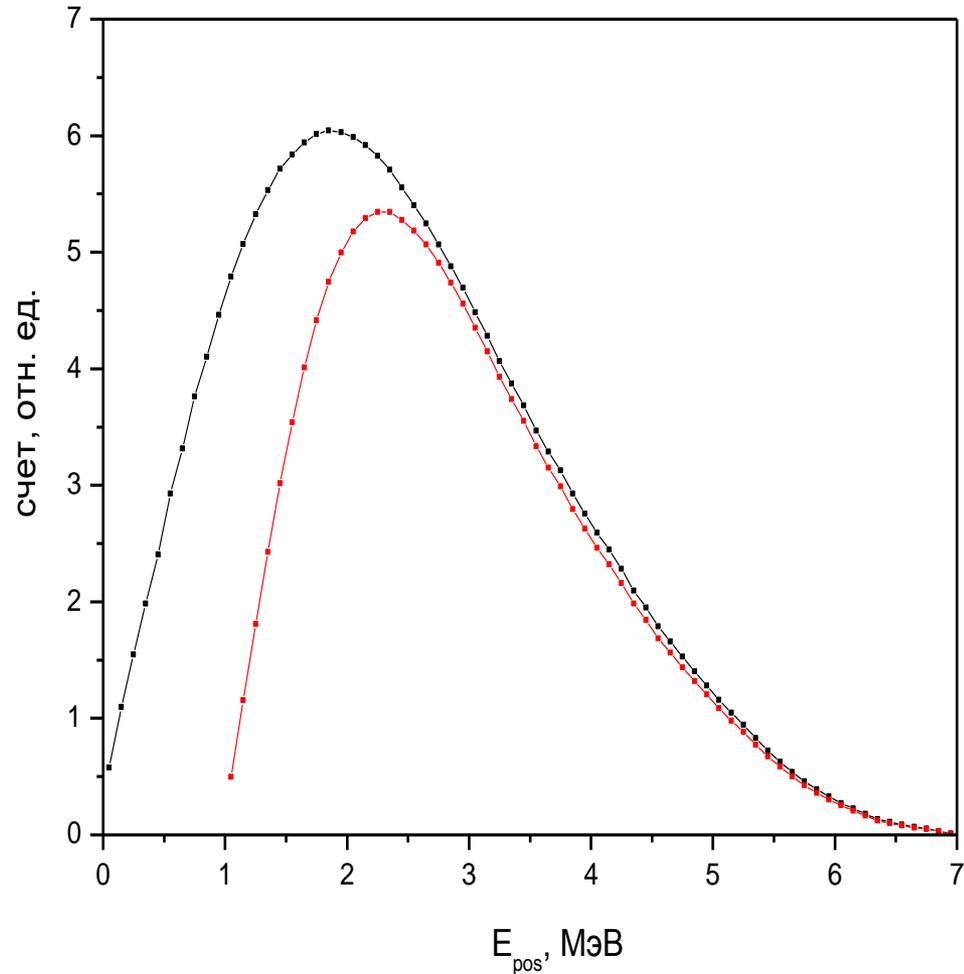
Для определения чувствительности эксперимента вычислялся  $\chi^2$  для гипотезы отсутствия осцилляций. Искомая область чувствительности – это область, в которой  $\chi^2/\text{DoF} > 2.6$  (3 степени свободы, 95% CL).

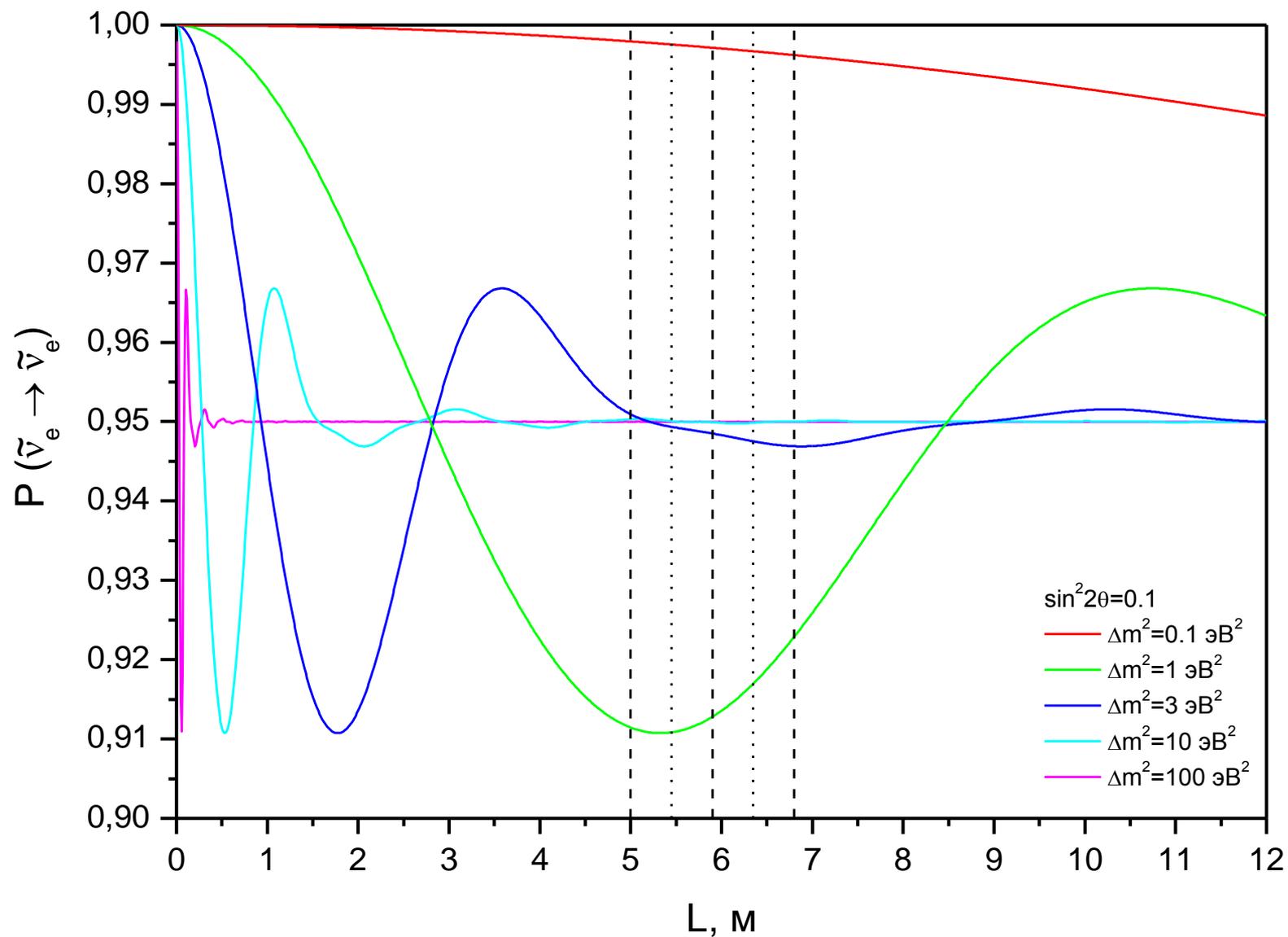
# Определение чувствительности эксперимента по поиску стерильного нейтрино на реакторе ВВР-М

Спектр позитронов реакции



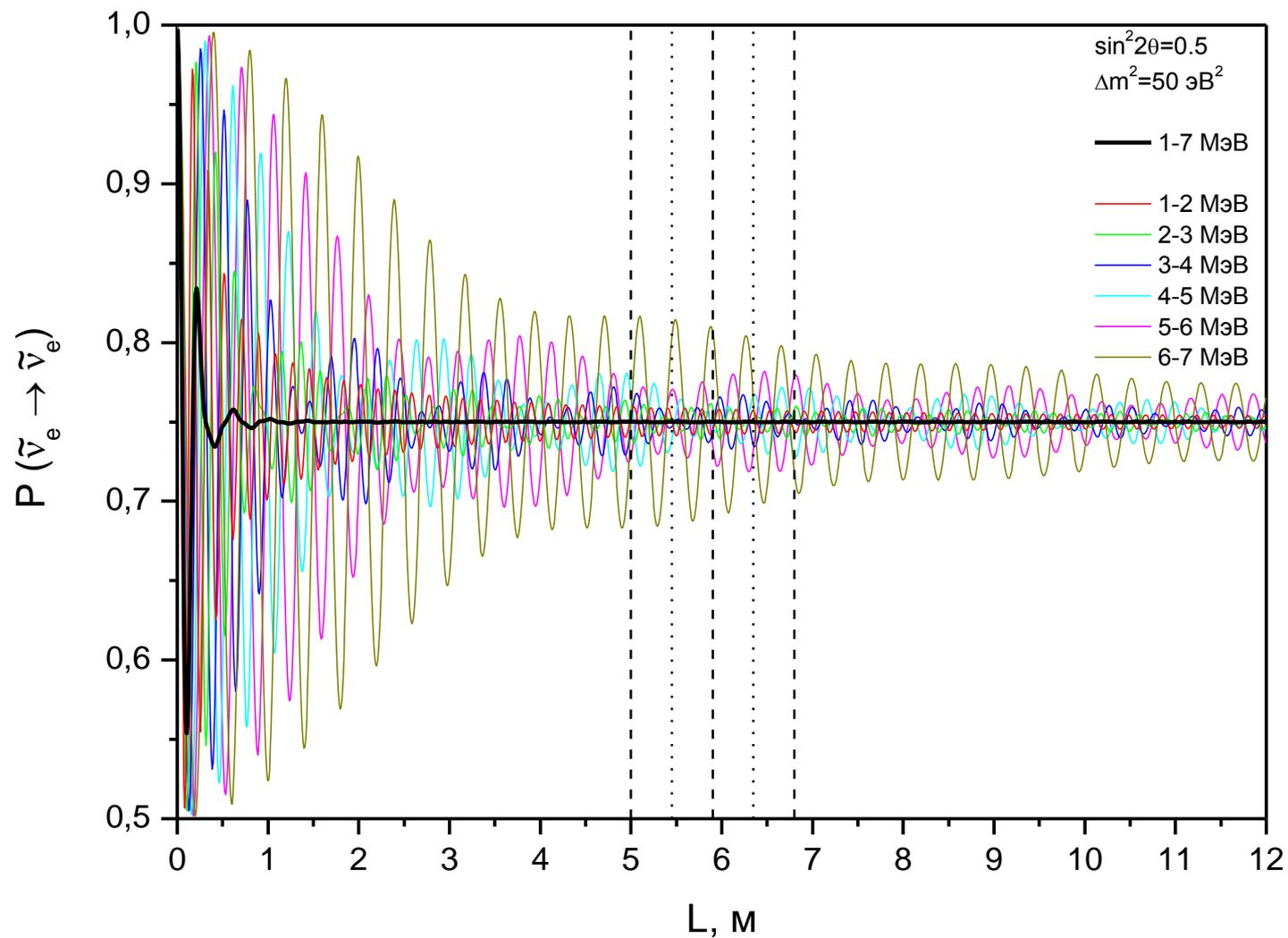
: черная кривая – реальный спектр,  
красная кривая – регистрируемый  
спектр.





Осцилляции реакторных антинейтрино для разных параметров осцилляций

$\sin^2 2\theta$  и  $\Delta m^2$

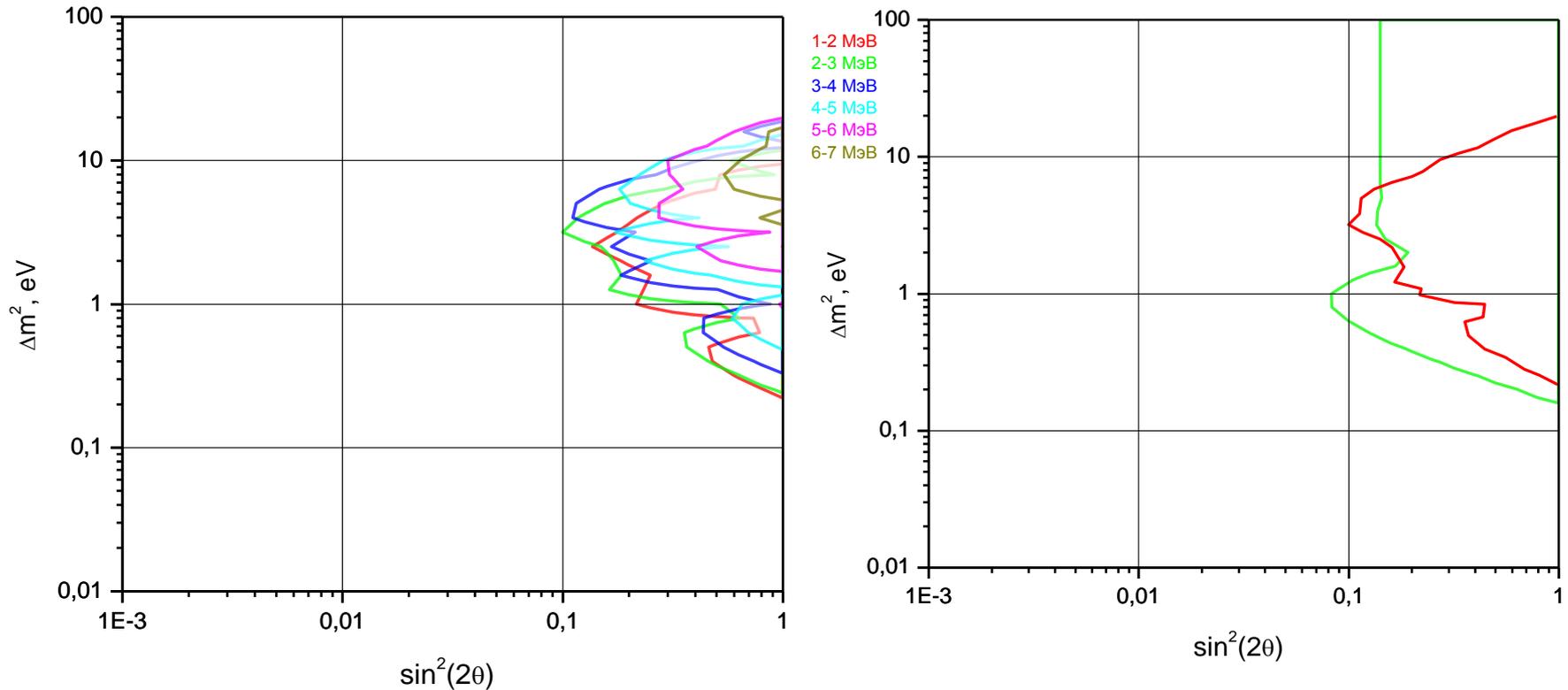


Осцилляции реакторных  
антинейтрино при

$$\sin^2 2\theta = 0.5 \text{ и } \Delta m^2 = 50 \text{ эВ}^2$$

для разных интервалов спектра позитронов

# Определение чувствительности эксперимента NEUTRINO-4 на реакторе ВВР-М

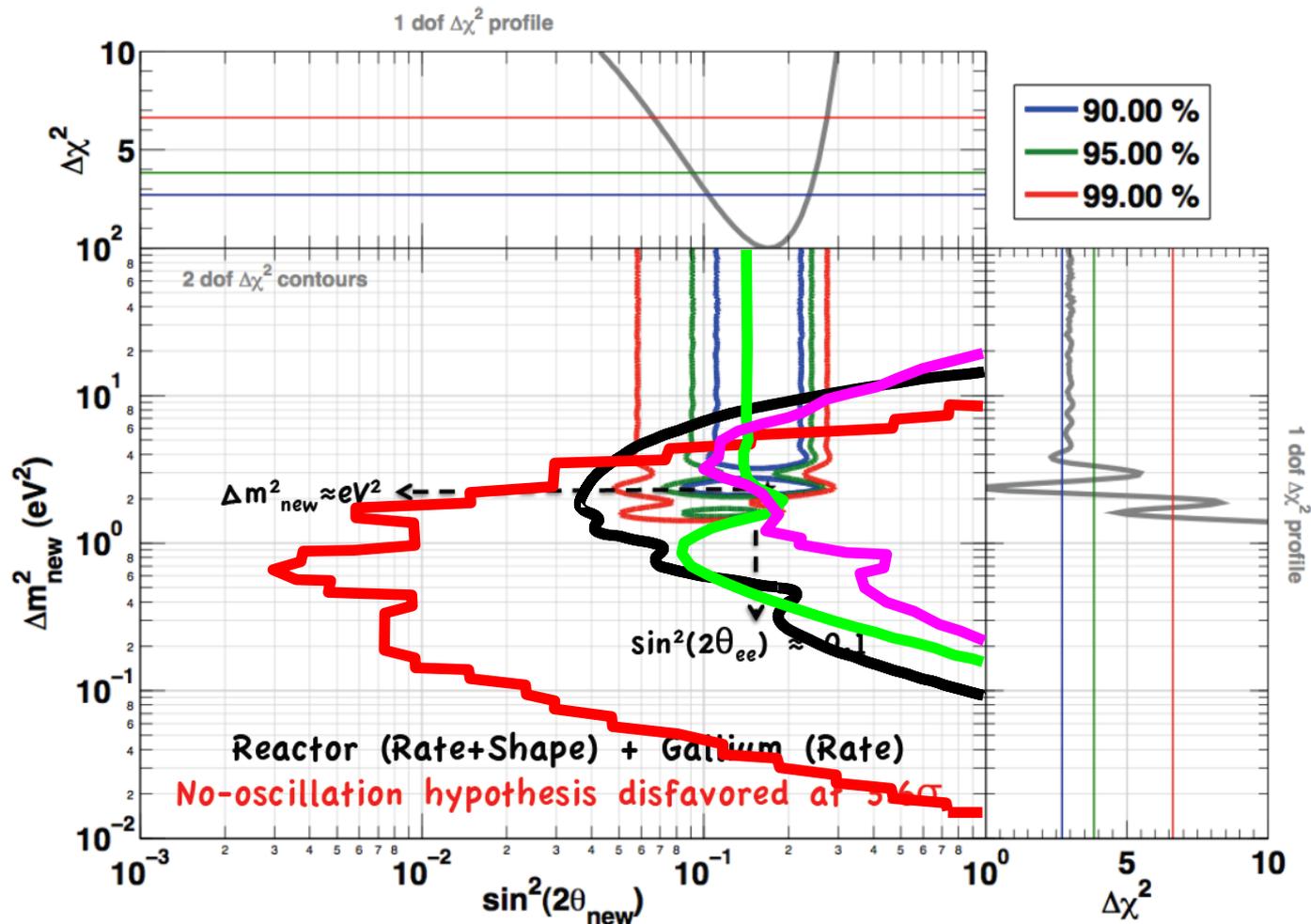


Область чувствительности эксперимента NEUTRINO-4 за 1 год измерений 95% CL:

а - при дифференциальном методе для разных интервалов спектра позитронов

б – при интегральном методе зелёная кривая.

# Сравнение областей чувствительности эксперимента НЕЙТРИНО-4 на реакторе ВВР-М к параметрам осцилляций



розовая и зелёная кривые – проект NEUTRINO-4;  
 черная кривая – проект STEREO (ILL),  
 красная кривая – проект DANSS (ВВЭР-1000).

# *Эксперимент* **NEUTRINO-4**

*по поиску стерильного  
нейтрино*

*на СМ-3*

*(проверка фоновых условий,  
проект, МК моделирование)*

**Заклучён договор о сотрудничестве с НИИАР.  
Сотрудники СМ-3 подготовили помещение для нейтринного эксперимента.**



**Измерение фоновых условий на реакторе СМ-3.  
14 – 17 Февраля 2011.**



*Демонтаж механизма шибера  
нейтронного пучка.  
Измерение нейтронного фона*



# *Установка дополнительной защиты Проверка подавления нейтронного фона*

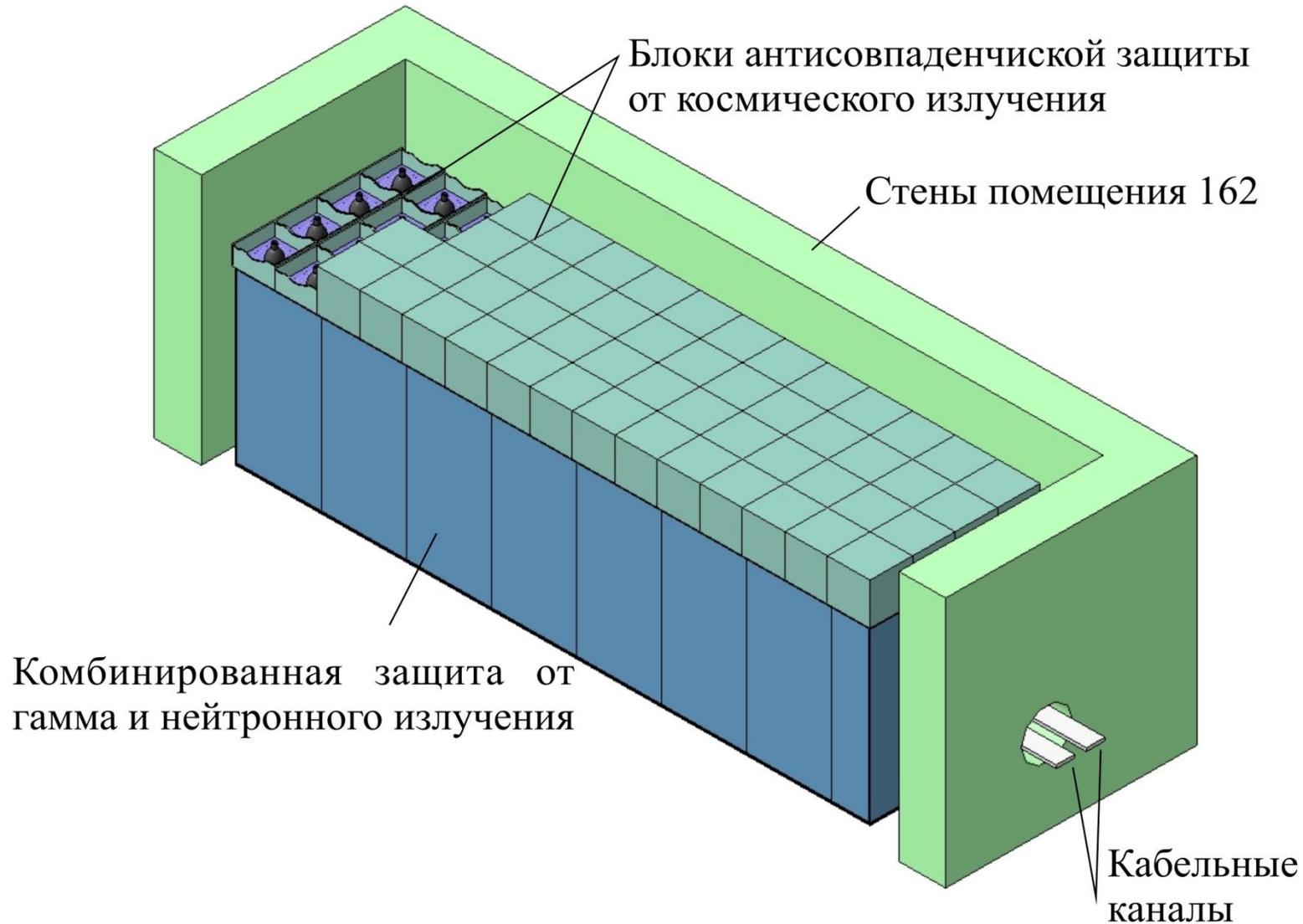


# Neutron background in shielding (CH<sub>2</sub> + B, concrete, Pb +B )

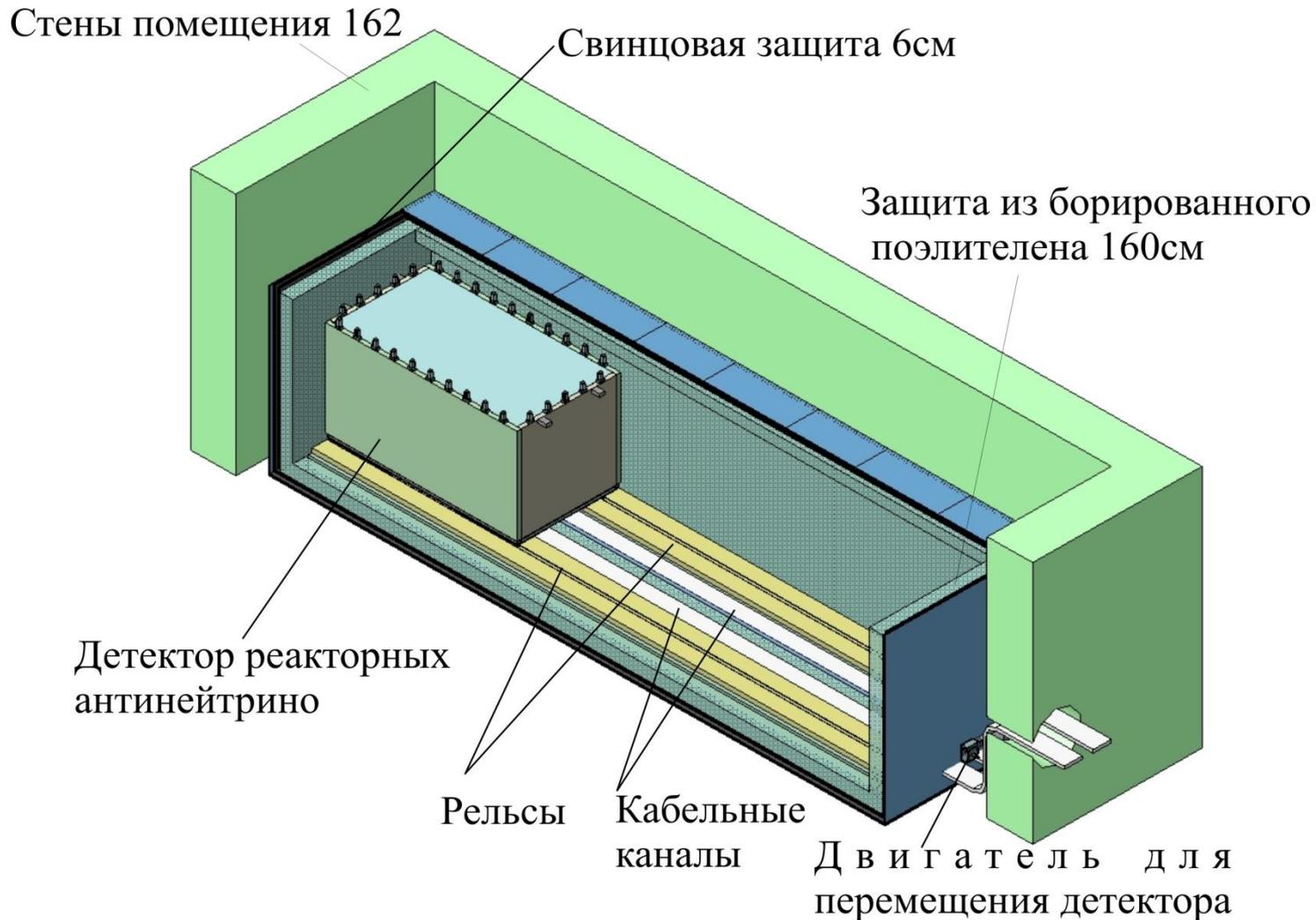
**Shielding factor - 10<sup>4</sup> - 10<sup>5</sup>**

	flux of thermal neutrons (n/cm <sup>2</sup> ·s) (reactor on)	flux of thermal neutrons (n/cm <sup>2</sup> ·s) (reactor off)	
WWR-M (16 MW) core 0.6x0.7x0.7m <sup>3</sup>	<b>8.9 × 10<sup>-5</sup></b> neutrons (n/cm <sup>2</sup> ·s) (with shielding)	<b>4.5 × 10<sup>-5</sup></b> neutrons (n/cm <sup>2</sup> ·s) (with shielding)	
SM-3 (100 MW) core 0.35x0.4x0.4 m <sup>3</sup>	<b>5 × 10<sup>-4</sup></b> neutrons (n/cm <sup>2</sup> ·s) (without shielding)		

# Проект детектора на реакторе СМ-3

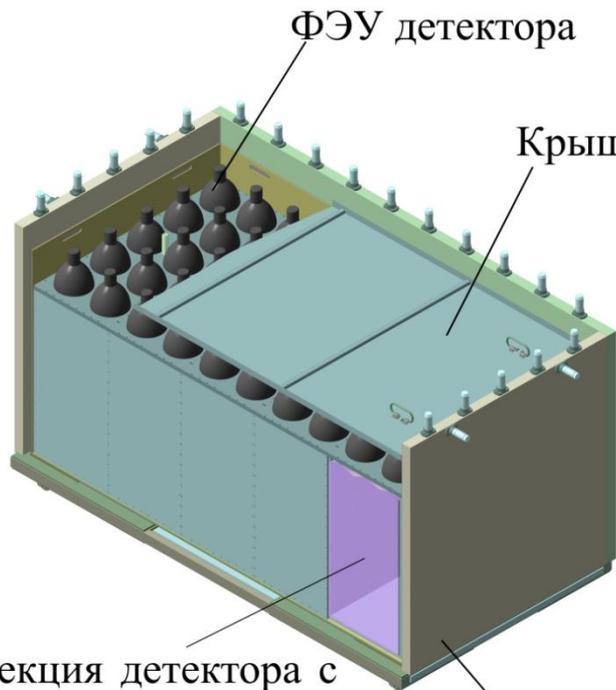
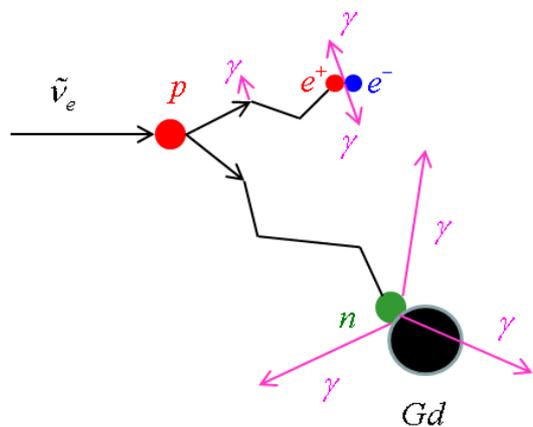
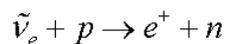


# Проект детектора на реакторе СМ-3



# Проект детектора на реакторе СМ-3

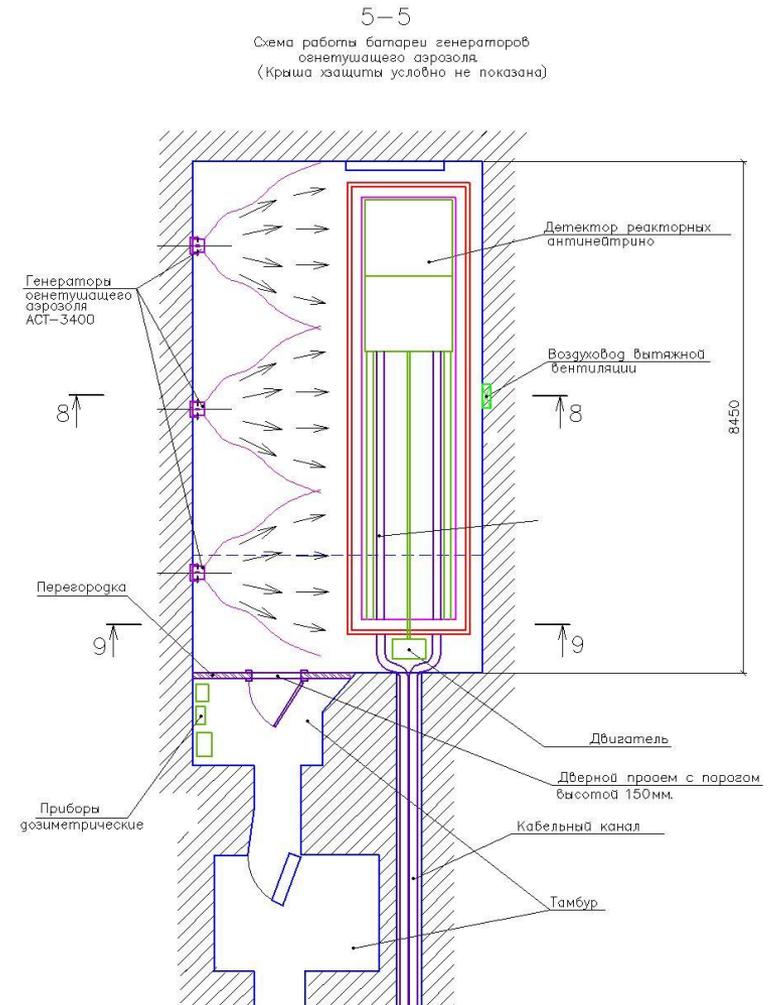
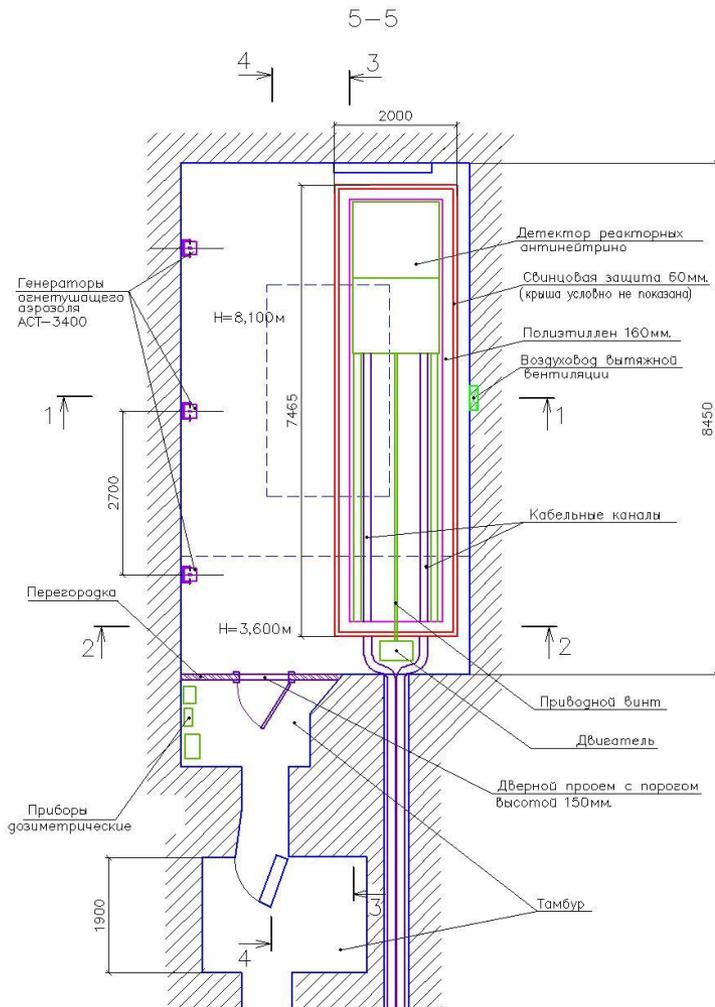
## Регистрация антинейтрино



Отдельная секция детектора с  
сцинтилляционной жидкостью

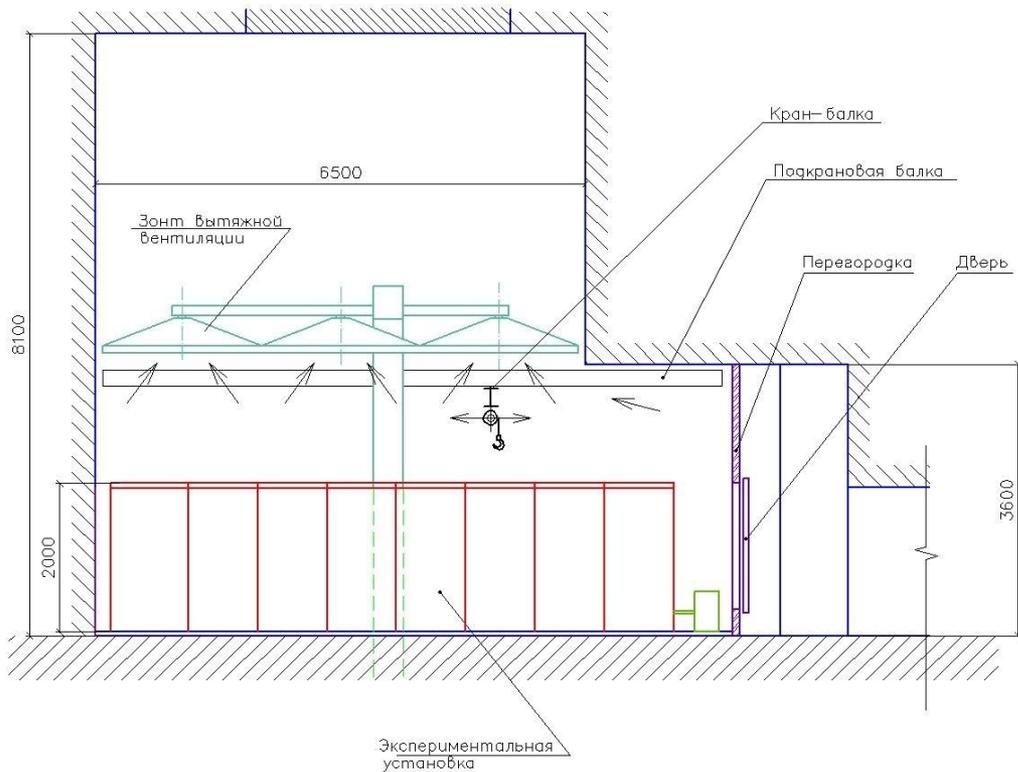
Сцинтилляционные пластины  
антисовпаденческой защиты с  
ФЭУ

# Проект детектора на реакторе СМ-3

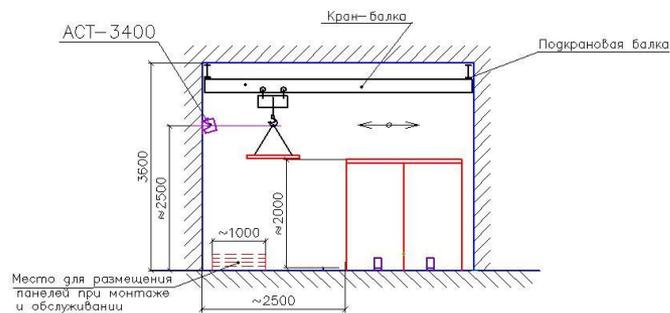
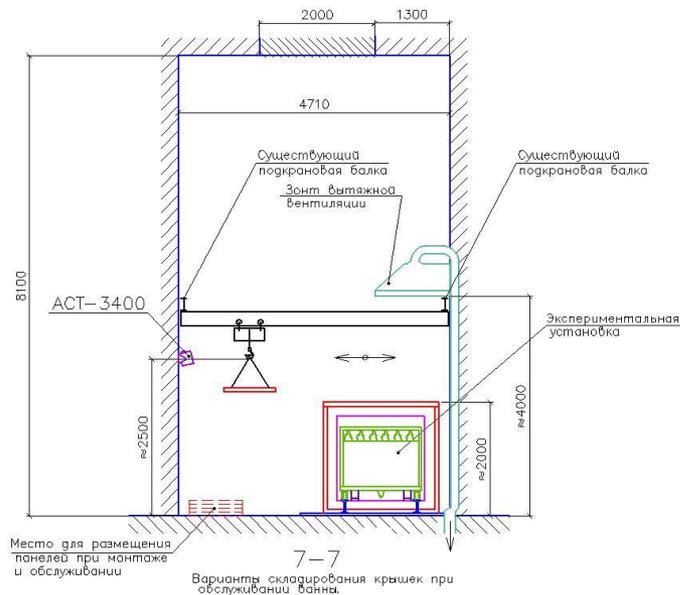


# Проект детектора на реакторе СМ-3

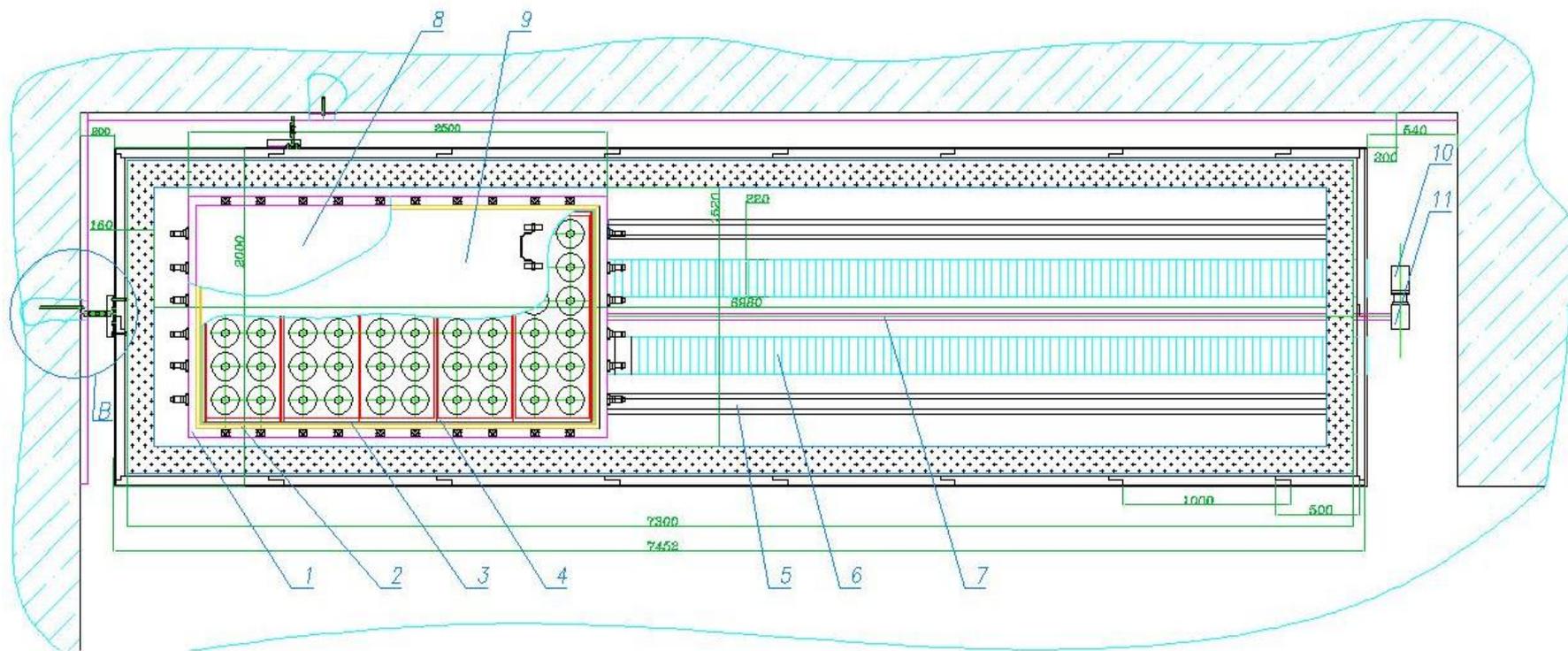
4-4  
Схема вытяжной вентиляции



6-6  
Схема перемещения крышек при обслуживании экспериментальной установки



# Вид сверху



1 – листы сцинтилляционной защиты с ФЭУ

2 – бак нержавеющей

3 – вкладыш тефлоновый

4 – бак фторопластовый с ФЭУ

5 – рельсы

6 – кабель-канал SB 028N

7 – шариковинтовая передача

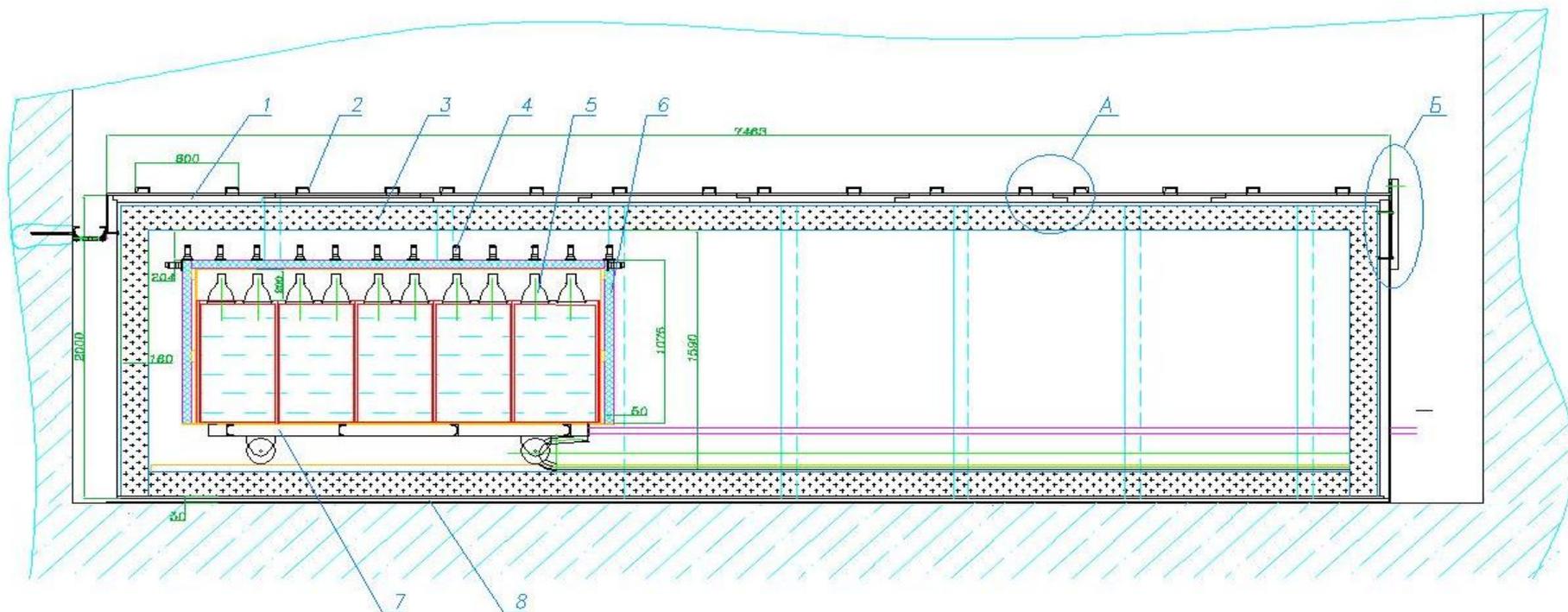
8 – лист сцинтилляционной защиты с ФЭУ

9 – крышка нержавеющей бака

10 – Двигатель шаговый FL 110 STH 150-6504A

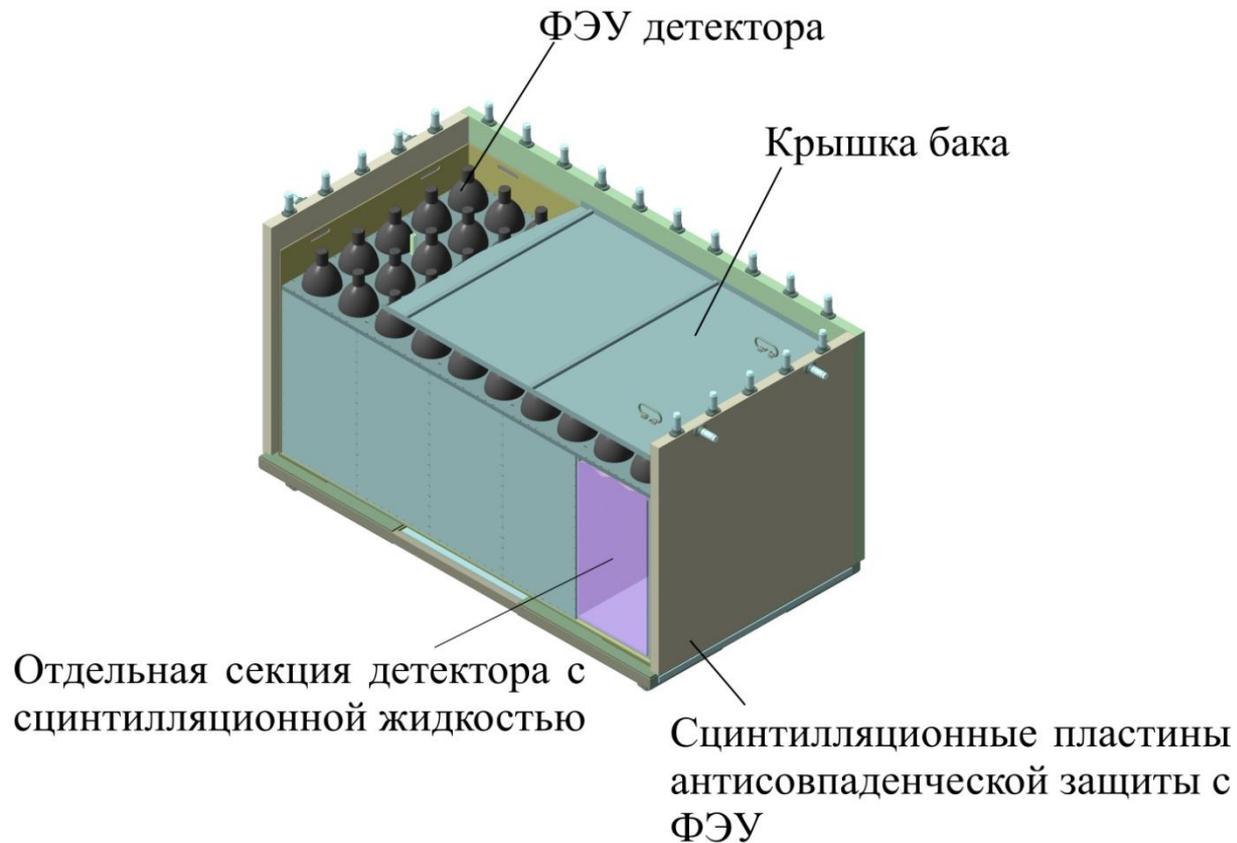
11 – Редуктор 64-63 ES-50-56-2-1-П-УЗ

# Вид сбоку

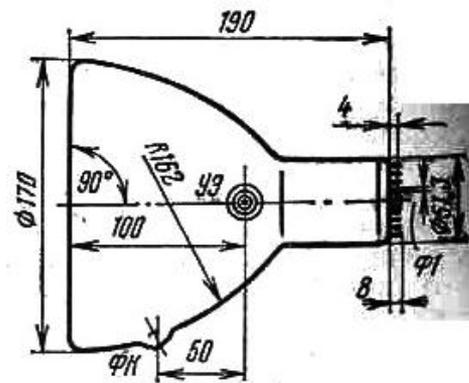
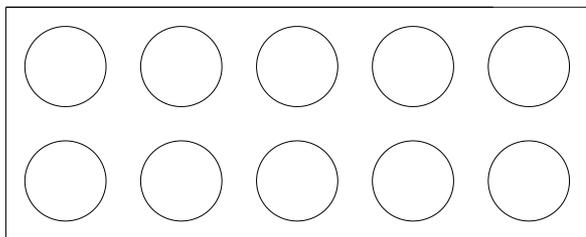
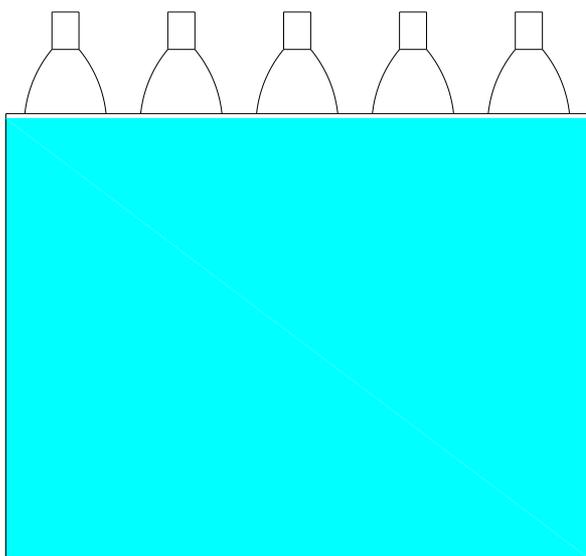


- 1 – блок защиты
- 2 – швеллер для усиления блока защиты
- 3 – полиэтилен
- 4,5 – ФЭУ
- 6 – лист сцинтилляционной защиты
- 7 – телега
- 8 – свинцовая защита пола

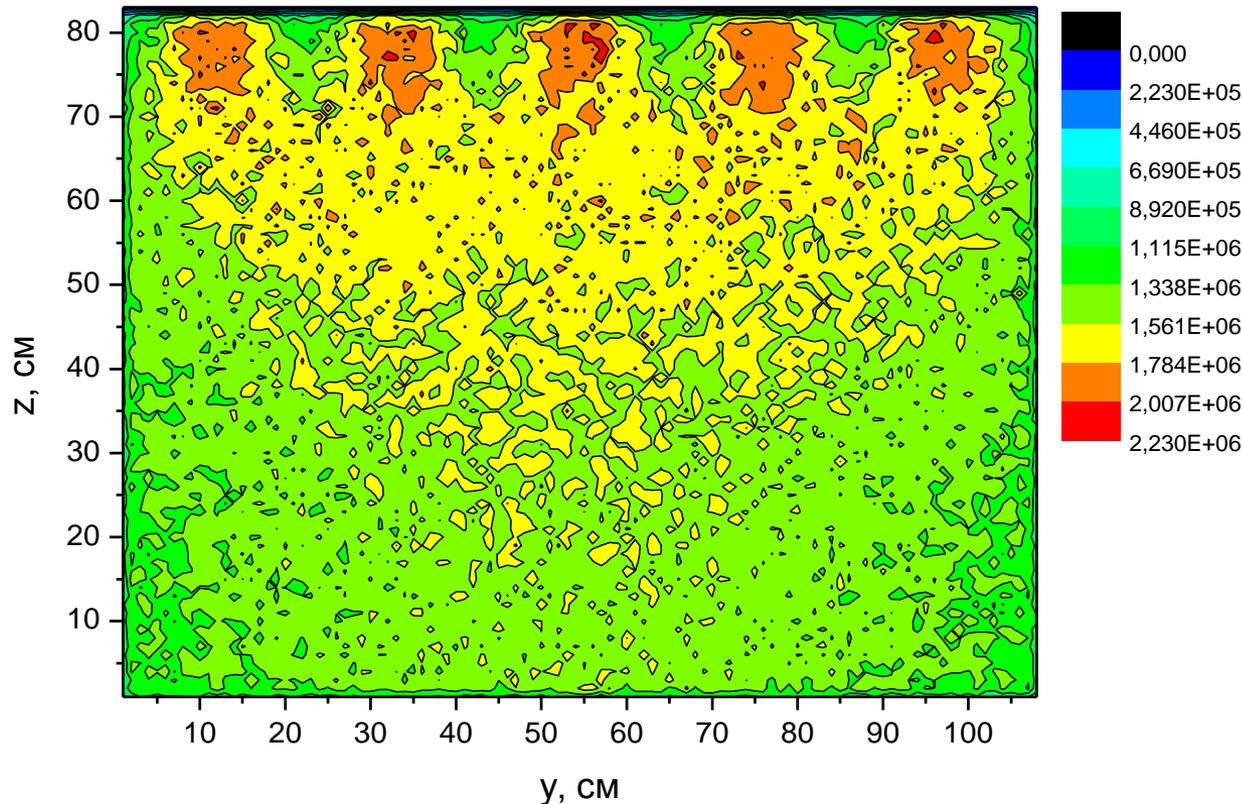
# Пяти-секционный передвижной детектор антинейтрино



# Состав отдельной секции

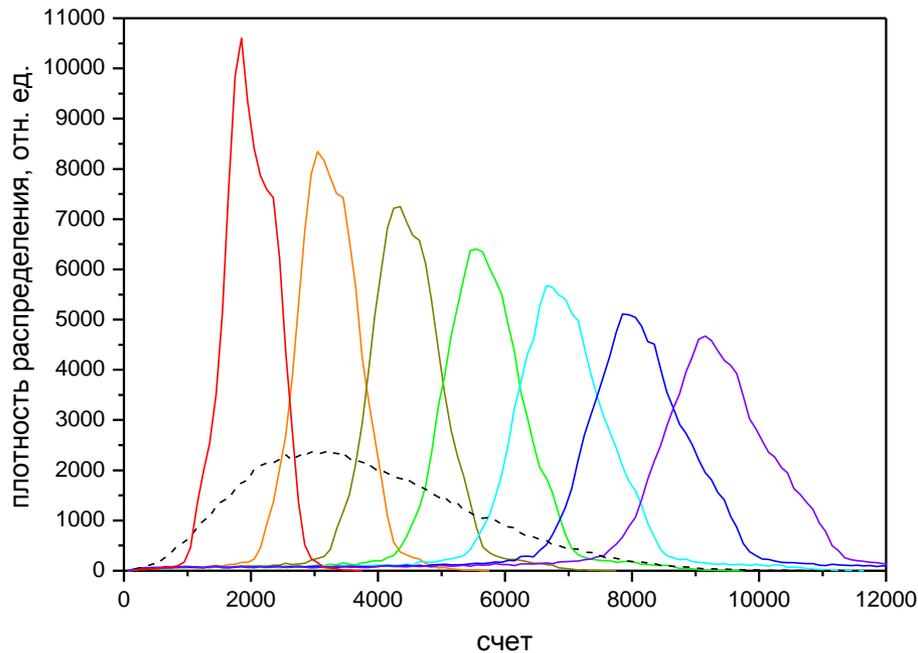


# Моделирование детектора реакторных антинейтрино на реакторе СМ-3 (неравномерность светосбора)

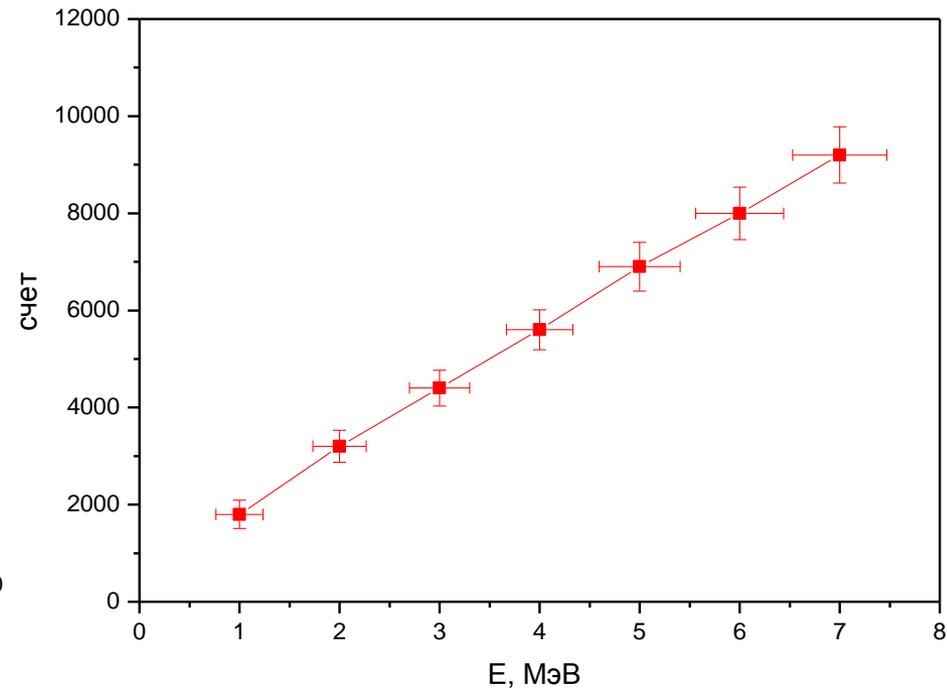


Число фотонов пришедших на ФЭУ секции детектора в зависимости от места рождения позитрона с энергией 4 МэВ.

# Моделированное энергетическое разрешение

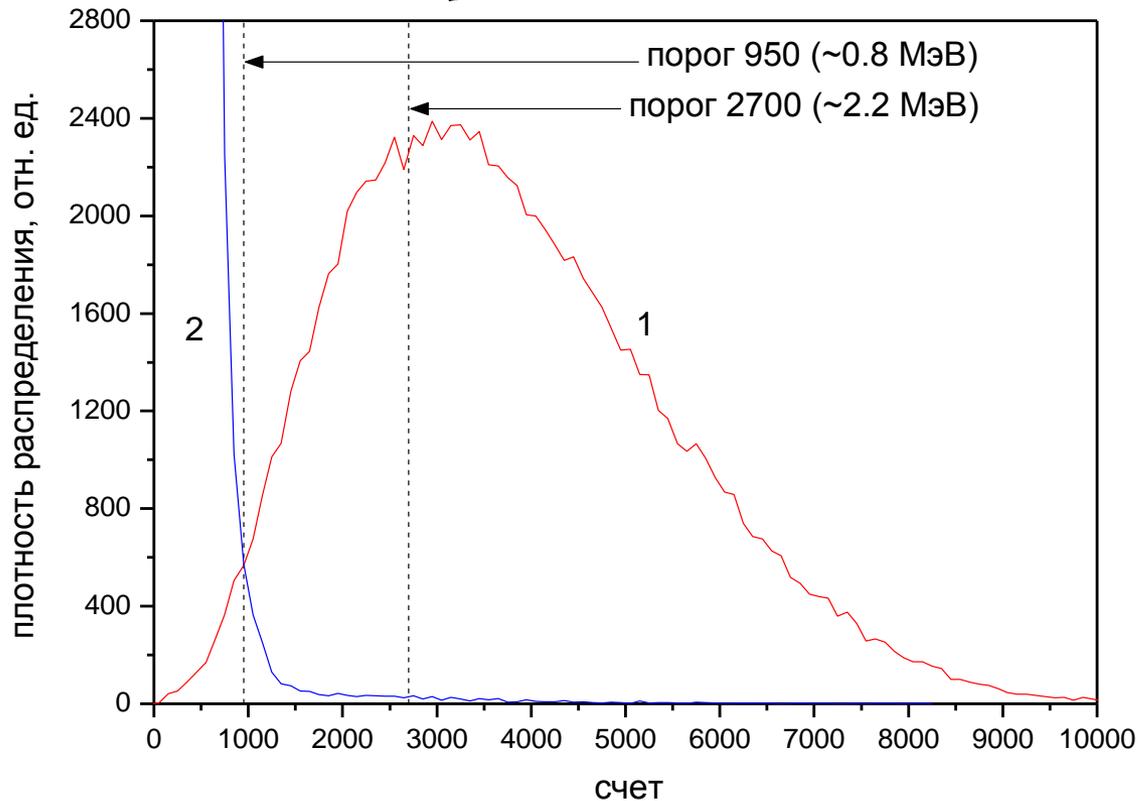


Распределение счета ФЭУ от позитронов с энергией от 1 до 7 МэВ. Штриховая линия – распределение для спектра позитронов.



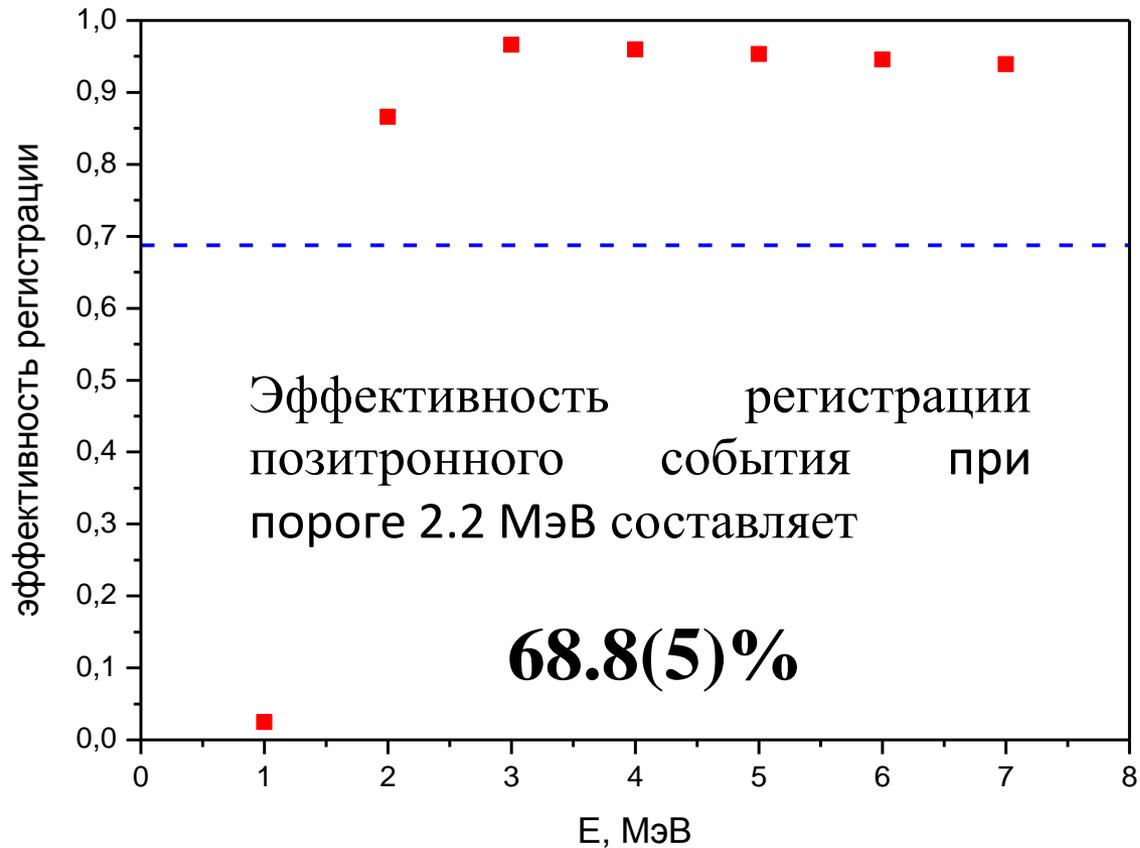
Зависимость для восстановления энергии позитрона по счету ФЭУ

# Моделирование детектора реакторных антинейтрино на реакторе СМ-3 (позитронный сигнал)



Сигнал от позитронного события в секции детектора. 1 – счет ФЭУ этой секции, 2 – счет ФЭУ остальных секций детектора.

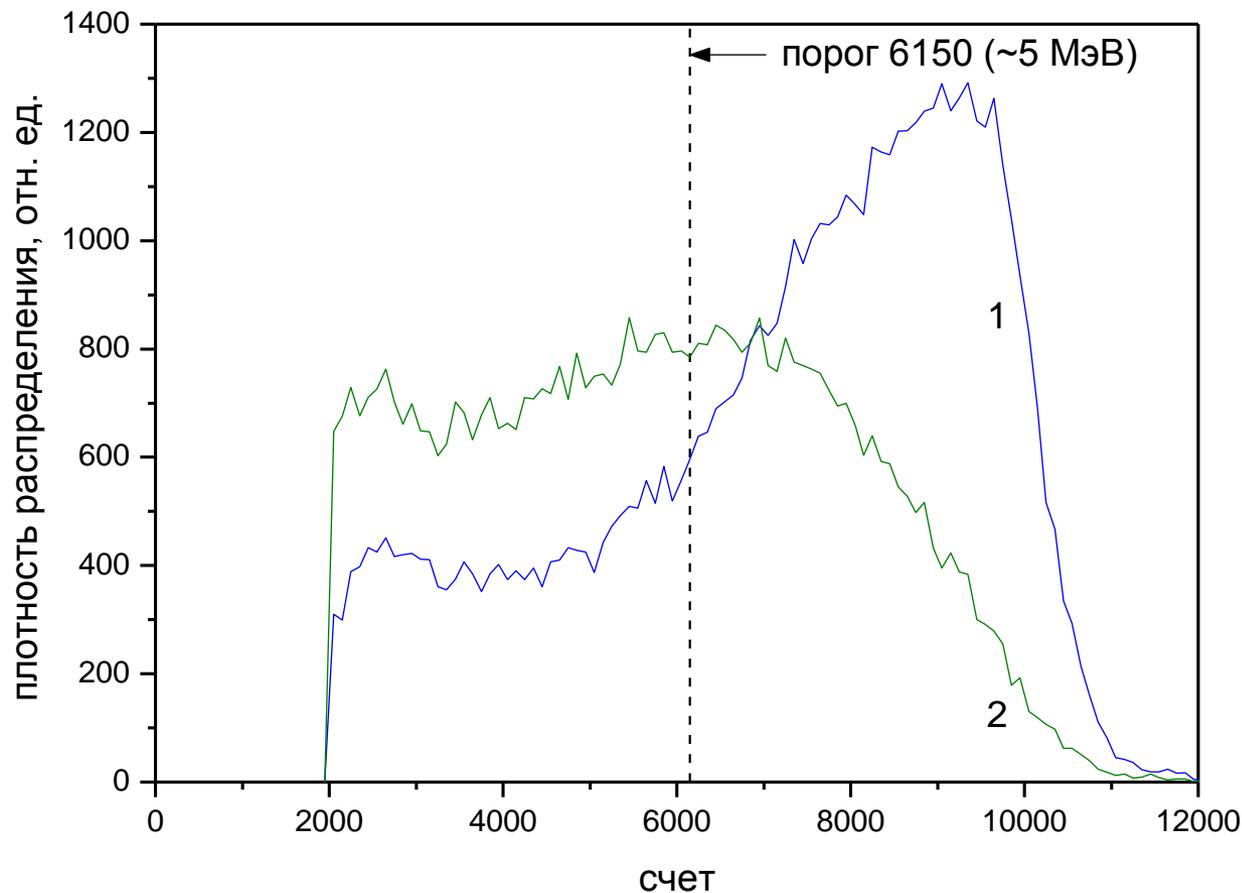
# Эффективность регистрации позитронного события в зависимости от энергии позитрона при пороге 2.2 МэВ.



Пунктирная линия – эффективность регистрации для всего спектра позитронов.

# Эффективность регистрации нейтронного события (утечка нейтронов и вылет гамма квантов за пределы детектора)

Возникающие в реакции нейтроны поглощаются гадолинием с образованием каскада гамма-квантов с суммарной энергией около 8 МэВ.



Распределение сигналов от нейтрона. 1 — счет ФЭУ всех секций детектора, 2 — счет ФЭУ только той секции детектора, в которой произошло событие.

# Эффективность регистрации антинейтрино в различных секциях детектора и полная эффективность регистрации

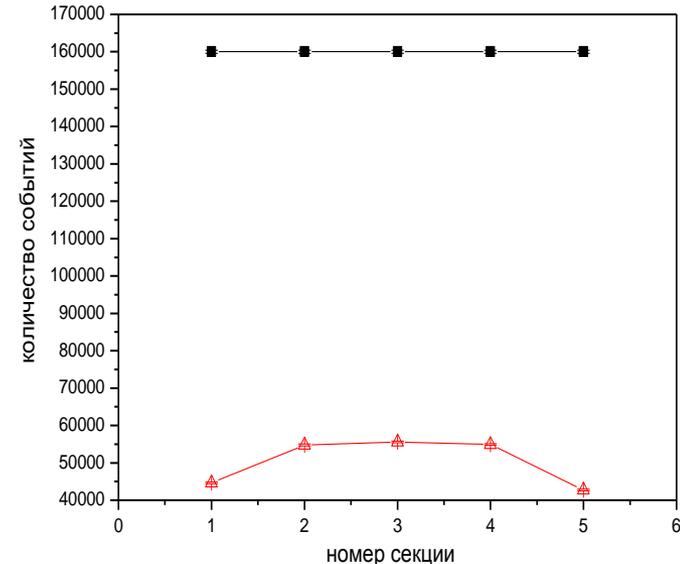
Эффективность регистрации нейтронного сигнала  $\varepsilon_n$  в средней секции детектора при нейтронном пороге 5МэВ составляет **61.6(5)%**.

С учетом того, что ~20% нейтронов захватывается водородом с выделением около 2.2 МэВ  $\varepsilon_n = \mathbf{49.3(5)\%}$ .

С учётом эффективности регистрации позитронного события при пороге 2.2 МэВ **68.8(5)%**

эффективность детектора в средней секции, полученная в результате моделирования, составляет

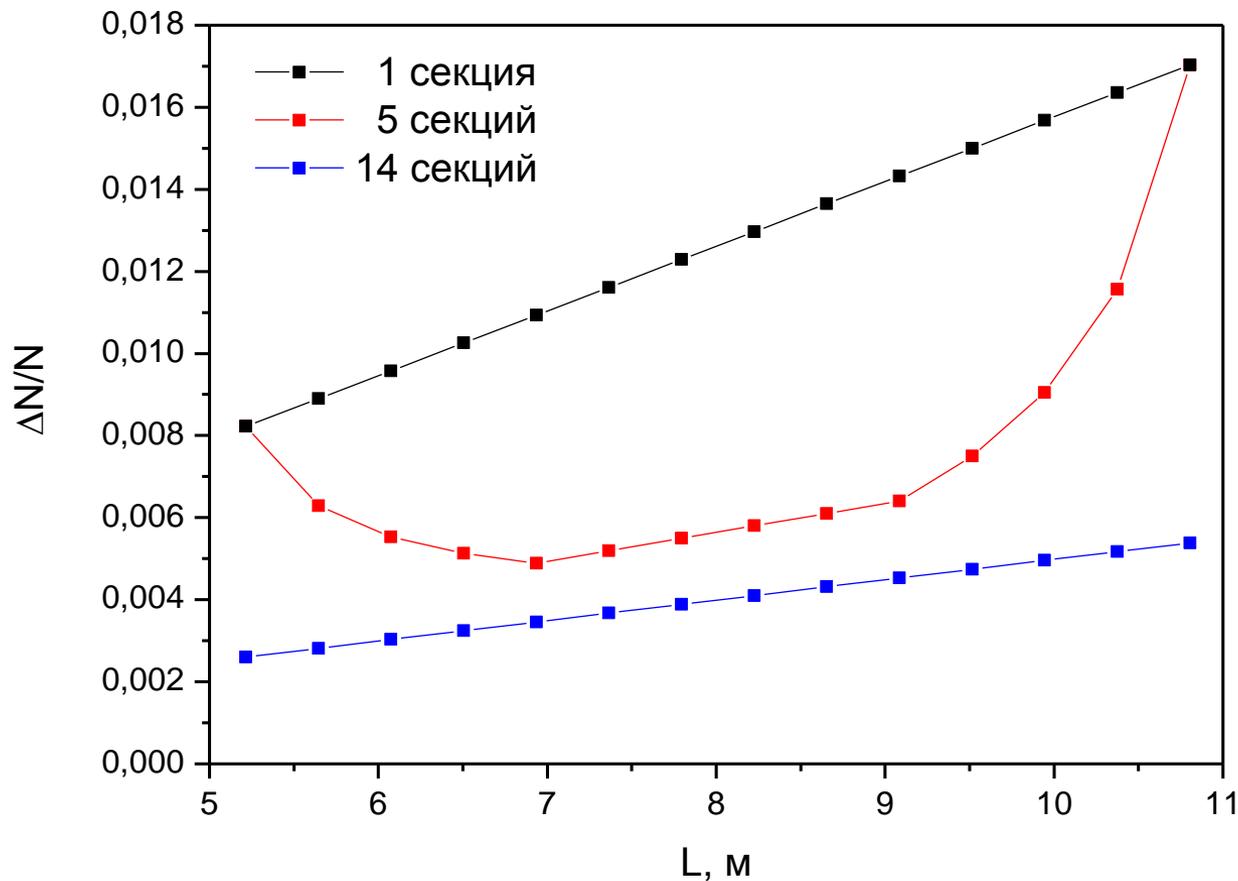
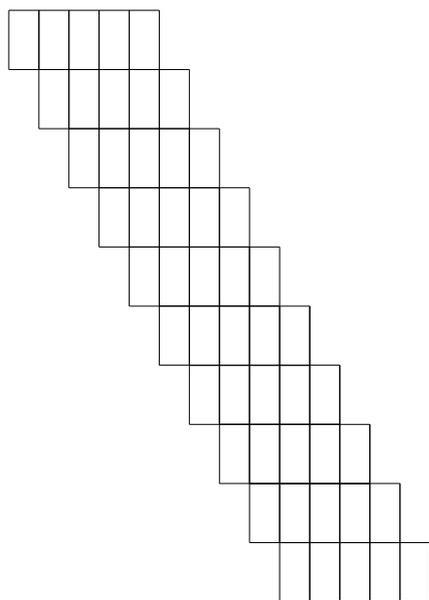
**34.8(5)%**



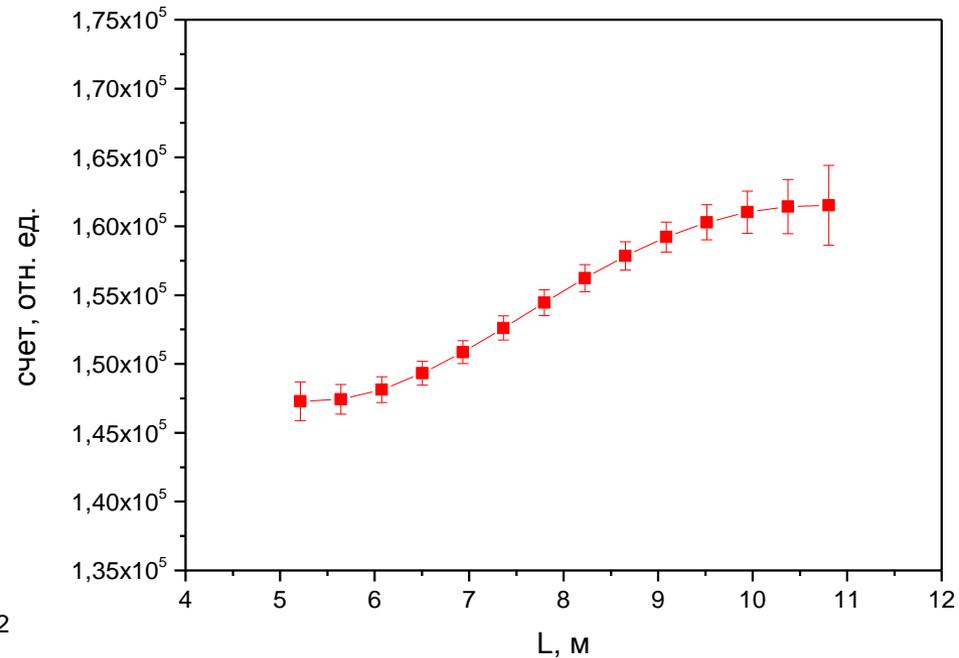
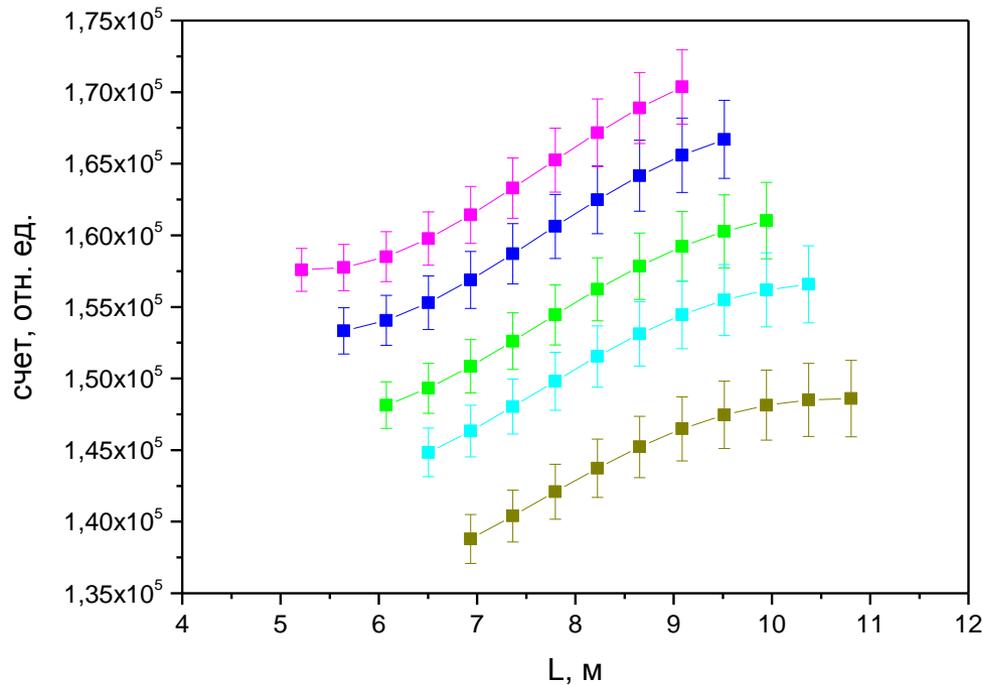
Распределение событий по секциям. ■ — фактические события (равномерное распределение), Δ — определение места события в результате моделирования.

Составлена МК-модель детектора реакторных антинейтрино. Расчетная эффективность детектора в средней секции составляет **34.8(5)%**. При этом эффективность регистрации позитронного сигнала 68.8(5)% (порог  $\sim 2.2$  МэВ), нейтронного сигнала 49.3(5)% (порог  $\sim 5$  МэВ).

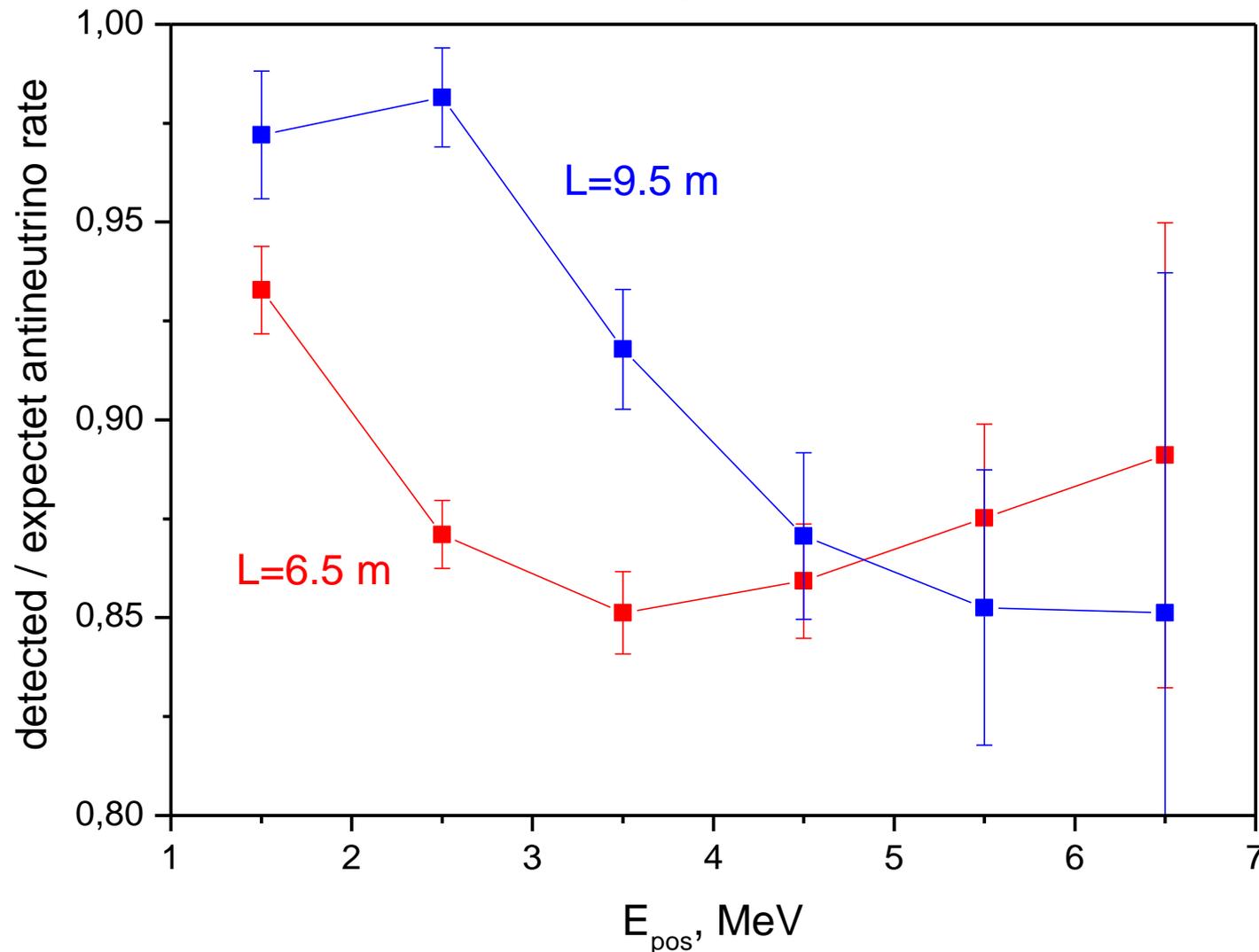
# Схема простого перемещения, статистическая точность и сравнение методов



*Получение зависимости эффекта вариации потока  
антинейтрино от расстояния  
 $\Delta m^2=1 \text{ эВ}^2 \quad \sin^2 2\theta=0.15$   
(один год чистого времени измерений)*



*Получение зависимости эффекта вариации спектра  
антинейтрино для  $\Delta m^2=1 \text{ эВ}^2$   $\sin^2 2\theta=0.15$   
(один год чистого времени измерений)*



# *Определение чувствительности эксперимента NEUTRINO-4 на реакторе СМ-3*

Чувствительность определялась для детектора 1.076 x 0.832 x 2.18 м<sup>3</sup>, который перемещался в диапазоне 6-12 м от активной зоны реактора СМ-3. Детектор состоит из 5 секций длиной 0.43 м. Детектор сцинтилляционного типа основан на использовании реакции  $\tilde{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$

Число ожидаемых событий составляет 3500 соб/(сутки·м<sup>3</sup>) на расстоянии 5 м от активной зоны.

# *Определение чувствительности эксперимента NEUTRINO-4 на реакторе CM-3*

В процессе измерений детектор последовательно перемещался на 1 секцию. Цикл перемещений состоит из 10 положений детектора. Точность измерений определялась за 365 суток при эффективности детектора 0.35. Процесс осцилляций описывается уравнением

$$P(\tilde{\nu}_e \rightarrow \tilde{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{эВ}^2] L [\text{м}]}{E_{\tilde{\nu}} [\text{МэВ}]} \right)$$

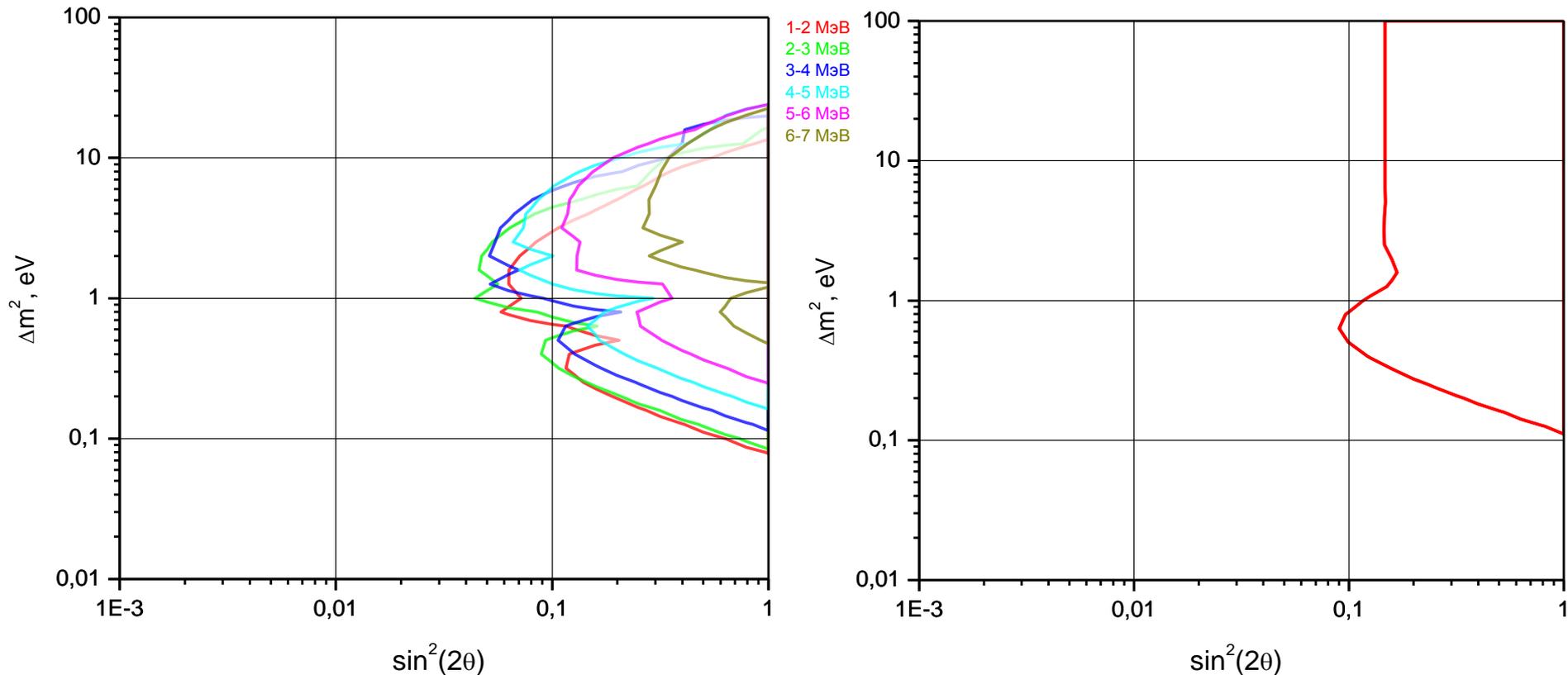
Для определения чувствительности эксперимента вычислялся  $\chi^2$  для гипотезы отсутствия осцилляций.

Искомая область чувствительности – это область, в которой  $\chi^2/\text{DoF} > 1.72$  (13 степеней свободы, 95% CL).

# Определение чувствительности эксперимента *NEUTRINO-4 на реакторе СМ-3*

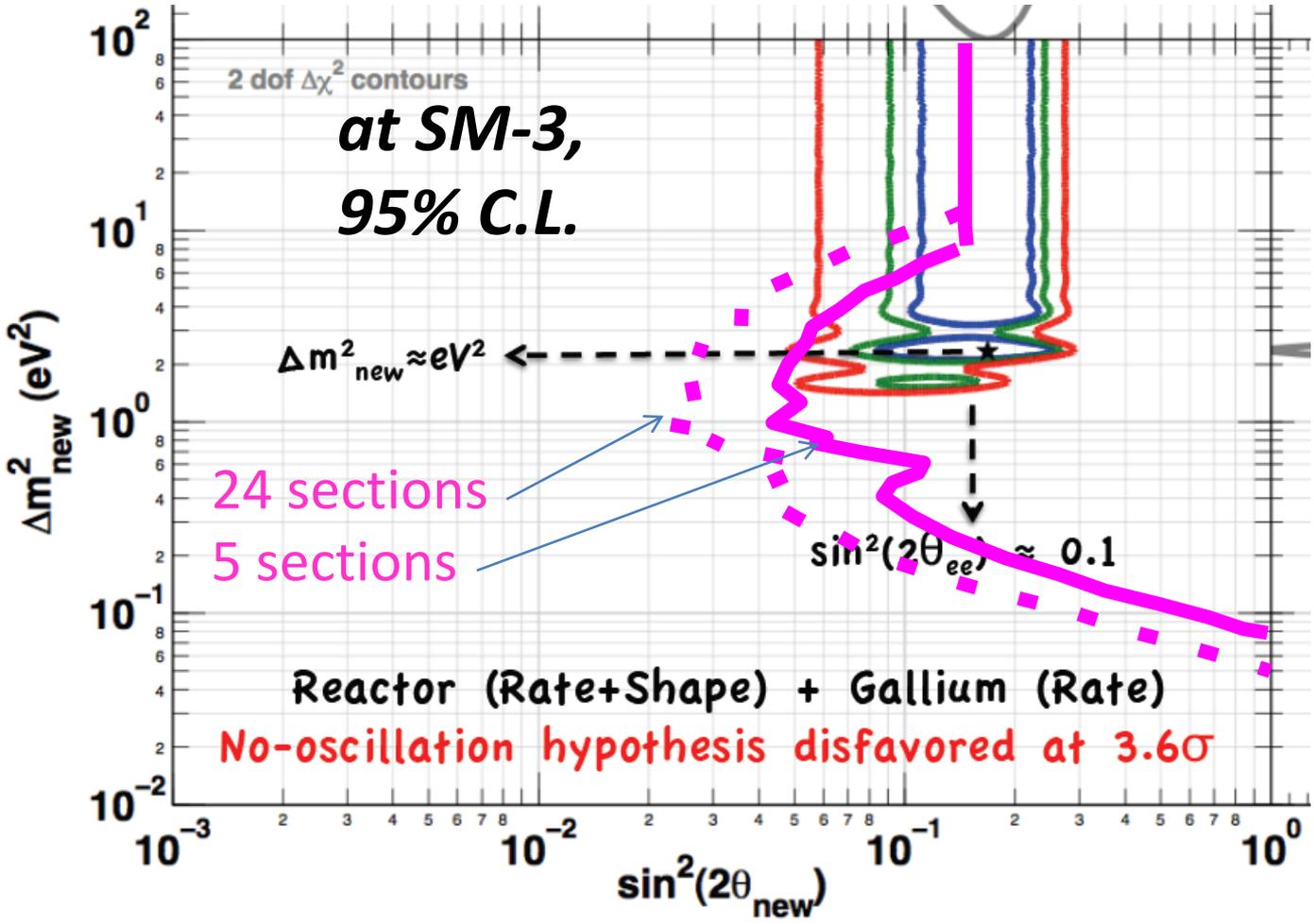
Чувствительность определялась 2-я методами. **Дифференциальный метод** – сравниваются измеренные поток и спектр антинейтрино между различными секциями детектора. **Интегральный метод** - сравниваются измеренные поток и спектр антинейтрино с расчетными. При определении чувствительности интегральным методом неопределенность, связанная со знанием потока антинейтрино от реактора принята равной 3%, а неопределенность, связанная со знанием эффективности детектора принята равной 4%.

# Определение чувствительности эксперимента NEUTRINO-4 на реакторе CM-3

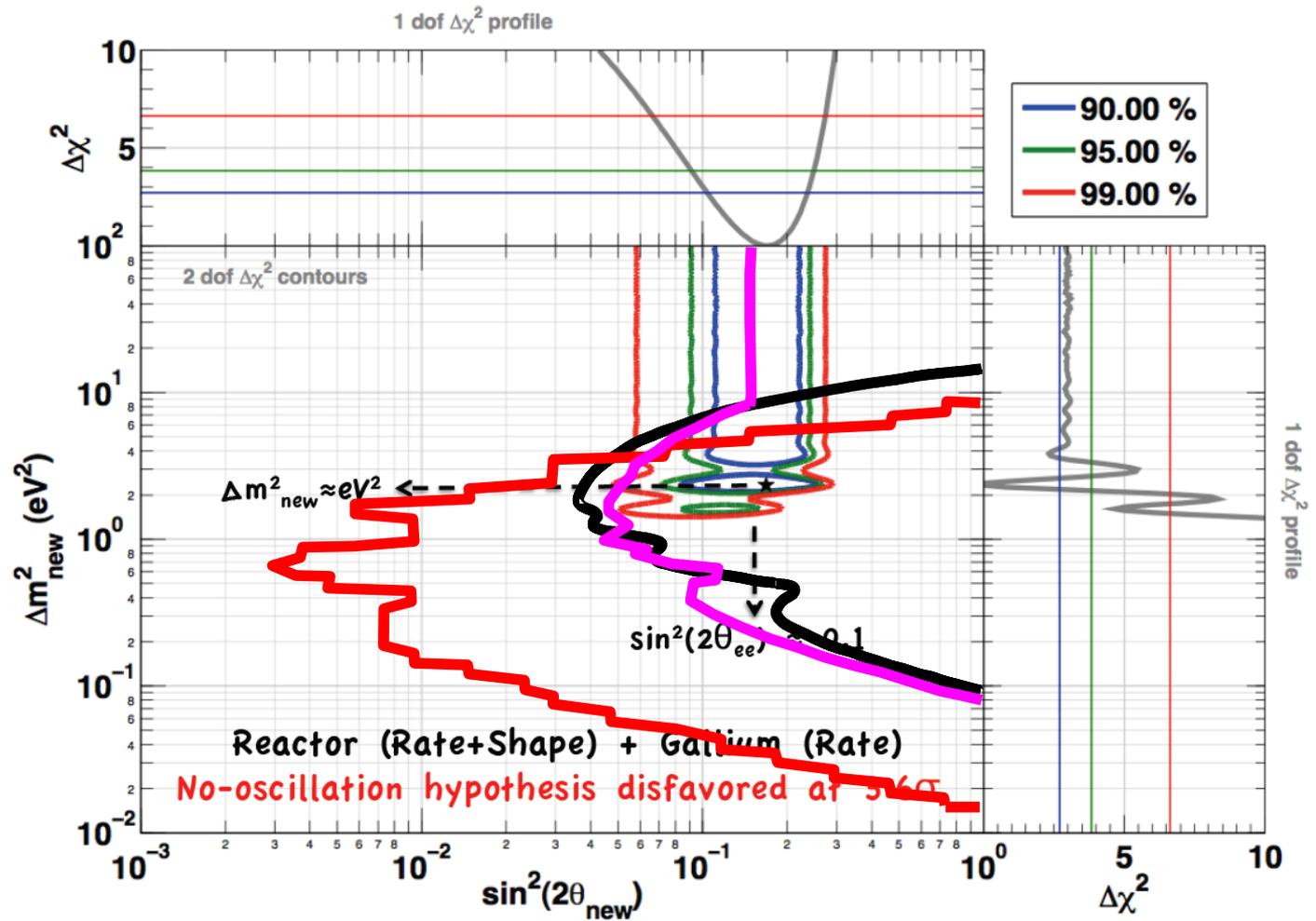


Область чувствительности эксперимента NEUTRINO-4 к параметрам осцилляций за 1 год измерений 95% CL: а - при дифференциальном методе для разных интервалов спектра позитронов реакции  $\tilde{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$  ; б - при интегральном методе.

*Область чувствительности эксперимента NEUTRINO-4 по поиску стерильного нейтрино к параметрам осцилляций за 1 год измерений 95% CL*



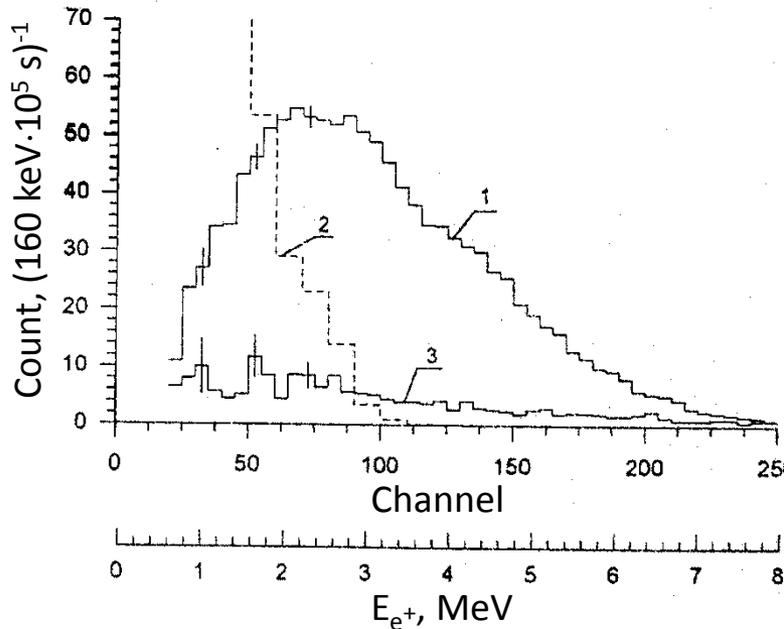
*Сравнение областей чувствительности эксперимента НЕЙТРИНО-4 на реакторе СМ-3 по поиску стерильного нейтрино к параметрам осцилляций*



*розовая кривая – проект NEUTRINO-4; черная кривая – проект STEREO (ILL),  
красная кривая – проект DANSS (ВВЭР-1000).*

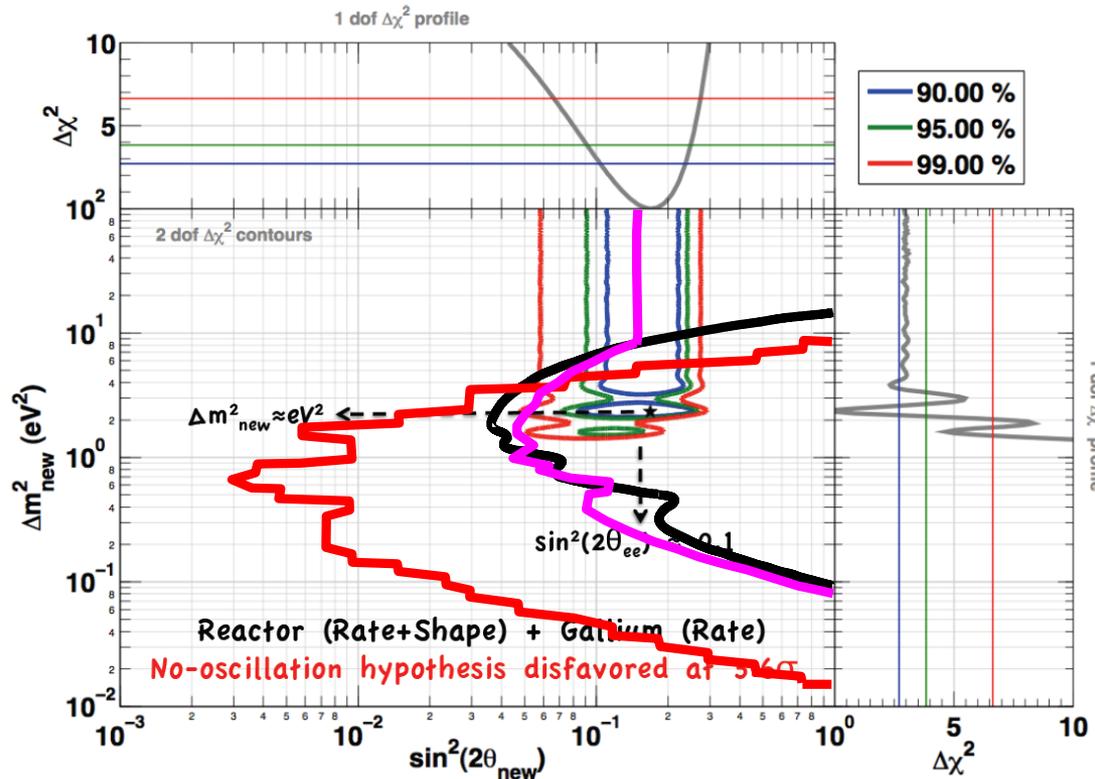
# NEUTRINO-4 at SM-3 reactor (6-12 m)

Expected conditions of measurements for single section ~500 l (based on the experiment of L.A. Mikaelyan group at Rovno atomic station)



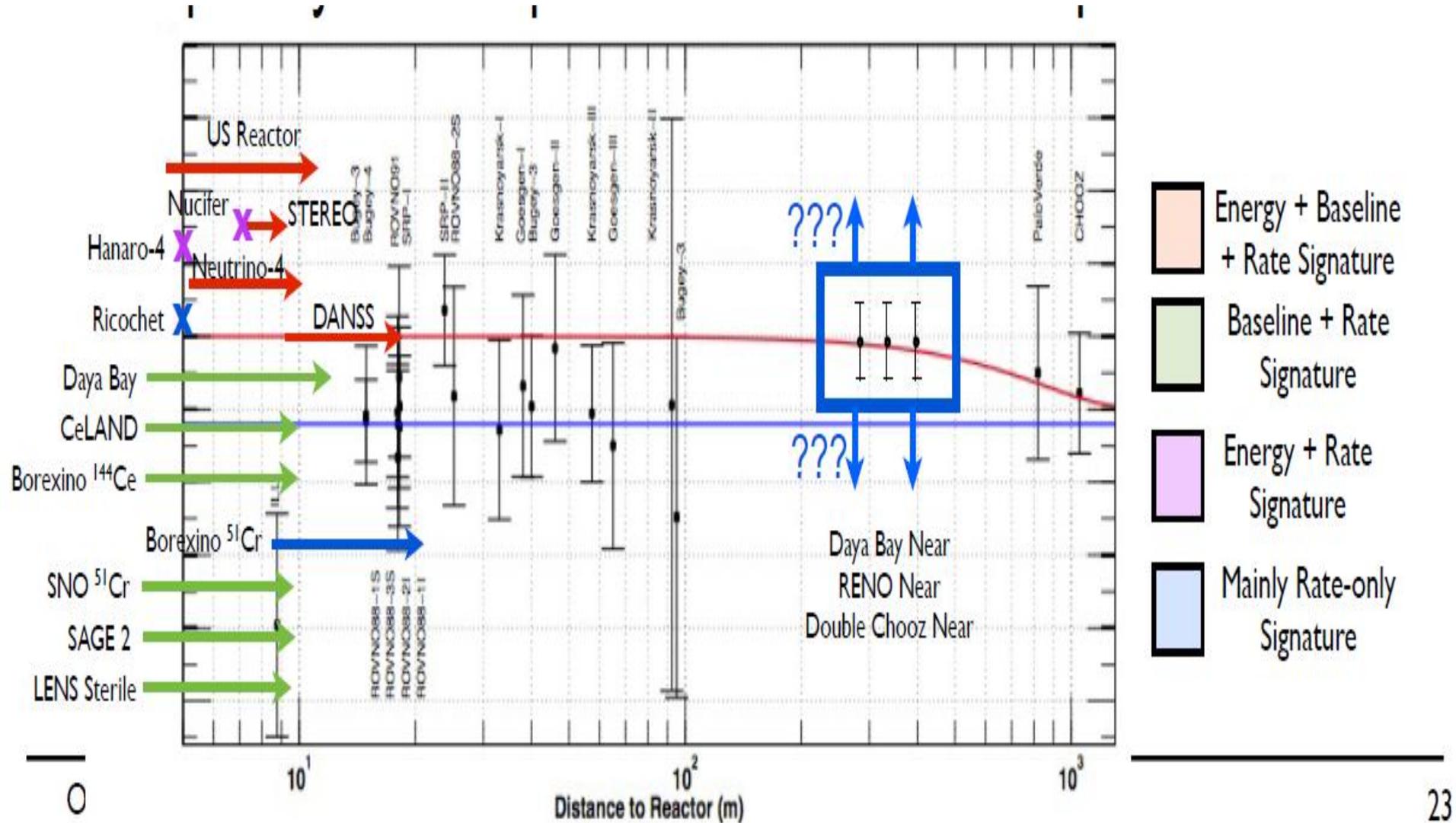
- 1 – neutrino effect + correlated background
- 2 – background of casual events
- 3 – correlated background

Preliminary area of sensitivity for 1 year of measurements 95% CL



In **NEUTRINO-4** threshold for positron signal will be 2 MeV, for neutron signal - 5 MeV.

# 14 реакторных экспериментов на старте



# *Заключение*

*Эксперимент по поиску осцилляций в  
стерильное нейтрино на реакторе SM-3  
следует активно форсировать!*

*Спасибо за внимание*

*Участники работы,  
внесшие вклад на различных её этапах  
от развития предложения до разработки новой  
и ранее изготовленной аппаратуры*

**ПИЯФ**

**А.П.Серебров, В.Г. Зиновьев, А.К.Фомин, В.А.Соловей, А.С.Чёрный,  
Э.М.Малютенков, Ю.Е.Логинов, М.С.Онегин, А.К.Гагарский, Г.А.Петров,  
С.П.Орлов, В.В.Марченков, Т. Савельева, И.А.Митропольский,  
О.М.Жеребцов, Л.А.Попеко, Л. Григорьева, В.Ивочкин, С.И.Калинин,  
Е.Н.Леонова, И.В.Шока, О.П.Федорова, О.Е.Шугаева, Е.П.Волков,  
Н.А.Николаев, Р.М.Самойлов, Н.Е.Антонов**

**Курчатовский институт**

**В.П.Мартемьянов, В.Л.Циноев, В.Г.Тарасенко, А.И.Алёшин,  
А.Сабельников**

**НИИАР**

**М.Н.Святкин, А.Л.Петелин, С.А.Сазонтов, Д.К.Рязанов, М.О.Громов,  
Н.С.Храмков.**

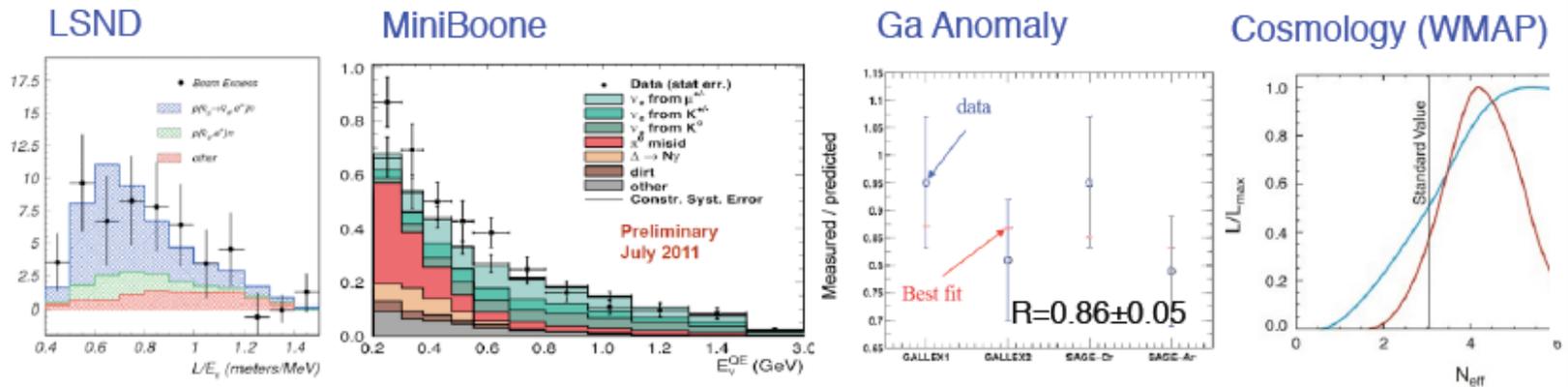
**ИФВЭ**

**В.И.Рыкалин**



# Motivations Search for sterile neutrino

## Neutrino Anomalies & Sterile $\nu$ Hypothesis



Anomalies in 3- $\nu$  interpretation of global neutrino oscillation data

LSND ( $\bar{\nu}_e$  appearance)

MiniBoone ( $\bar{\nu}_e$  appearance)

Ga anomaly

$N_{eff}$  in cosmology

Short-baseline reactor anomaly ( $\bar{\nu}_e$  disappearance)

if new oscillation signal, requires  $\Delta m^2 \sim O(1eV^2)$  and  $\sin^2 2\theta > 10^{-3}$

→ very short baseline oscillation for reactor  $\nu$ ,  $L_{osc} \sim 2-10m$

systematics or experimental effects?

→ need to test each experimental effect

source experiments (Lasserre)  
acc experiments (Shaevitz)