

*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*

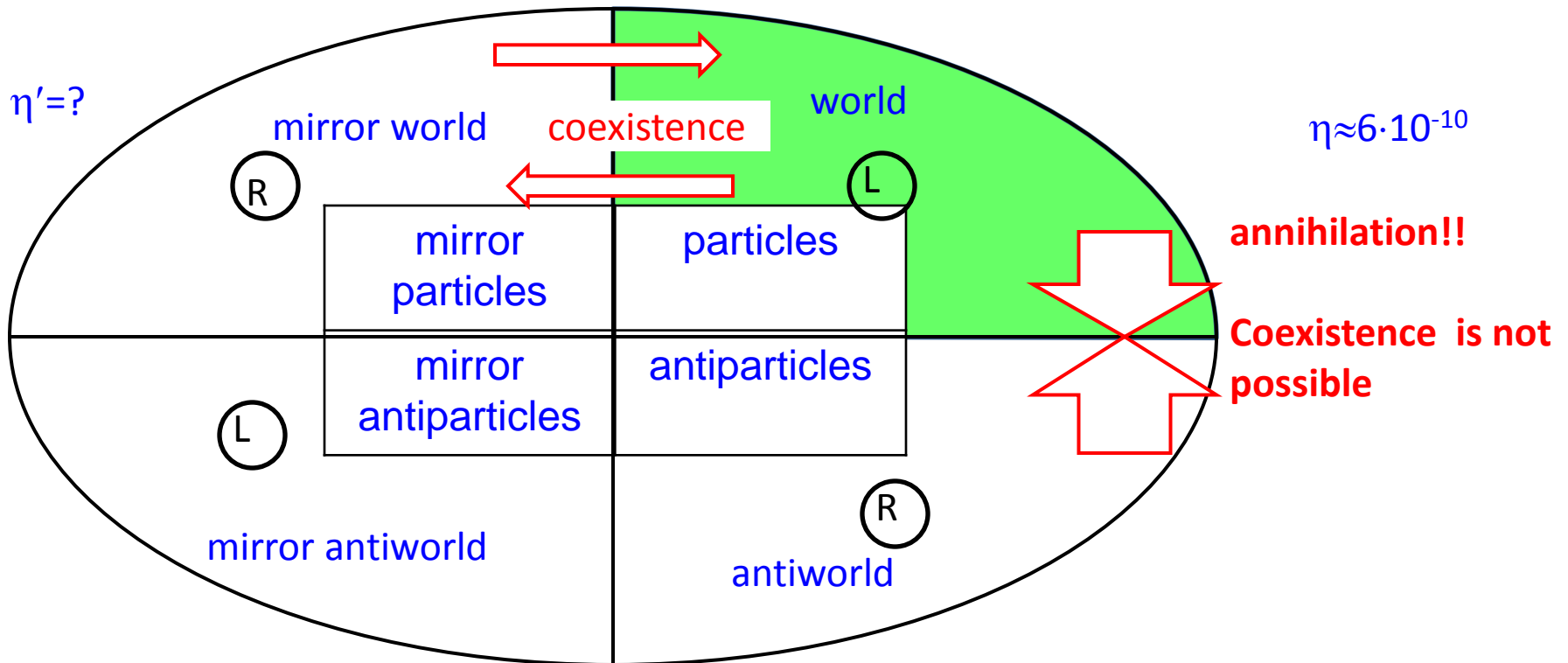
*Есть прогресс со времён Птолемея (127 -145 г.г.),
но мы понимаем только 5% Вселенной .*

Мы прошли очень много, но приблизились очень мало.



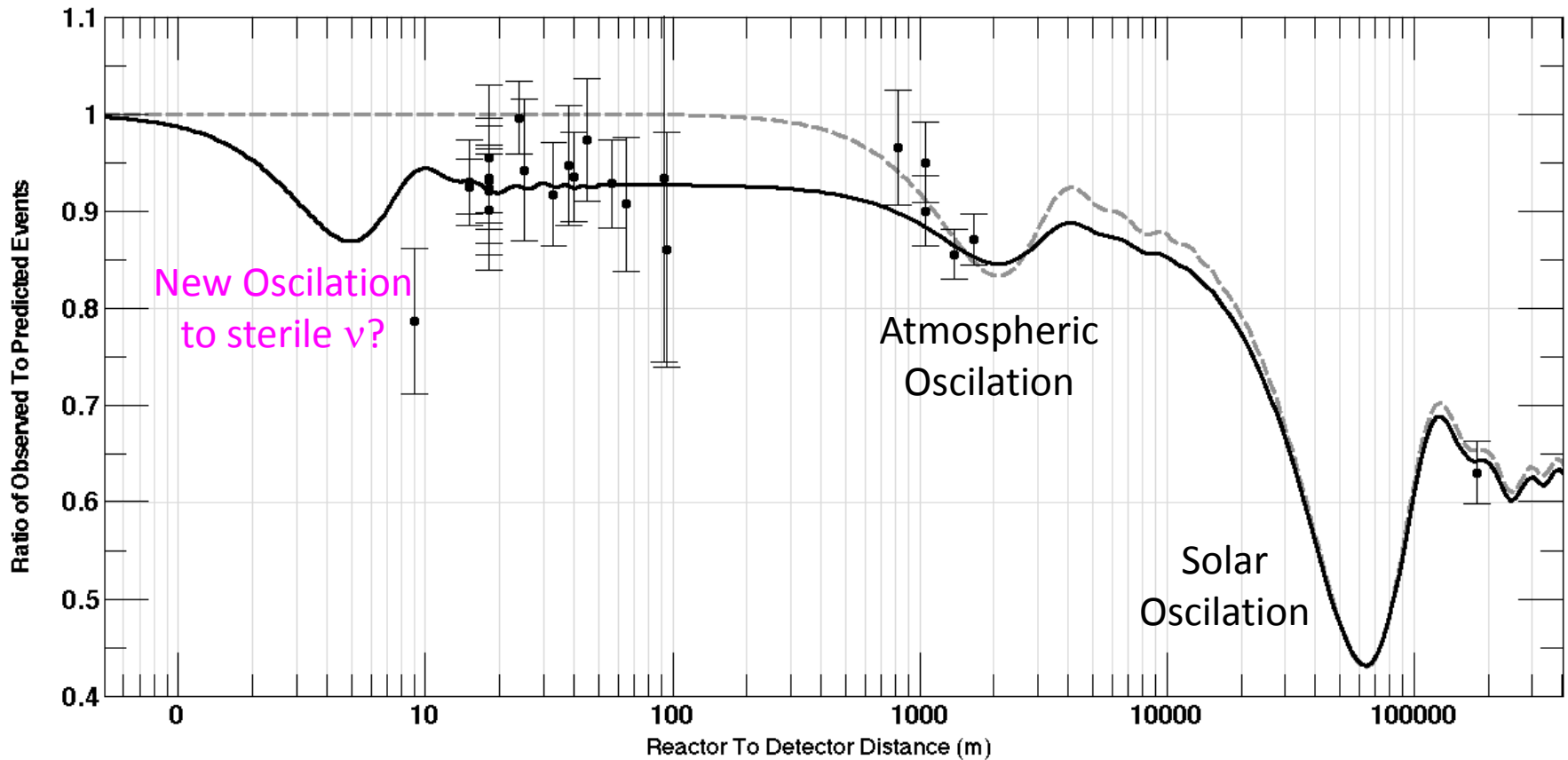
Асимметрия нашего мира

Coexistence is possible, transitions are complicated



Reactor Anomaly

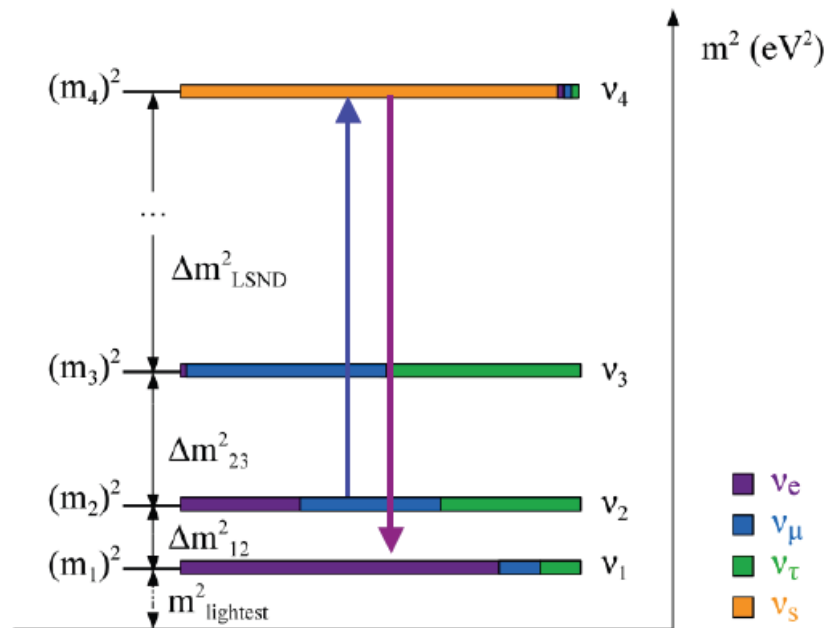
G. Mention et al., Phys. Rev. D83, 073006, 2011



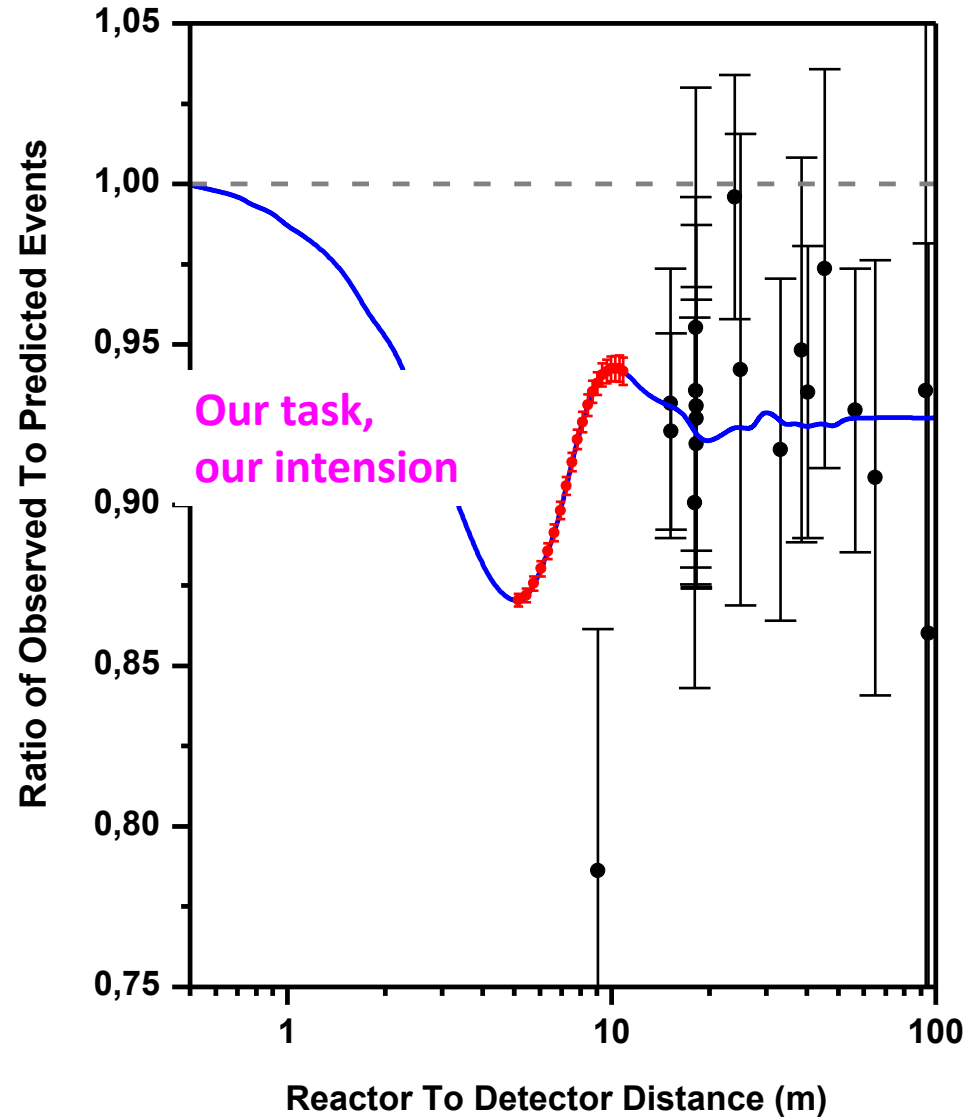
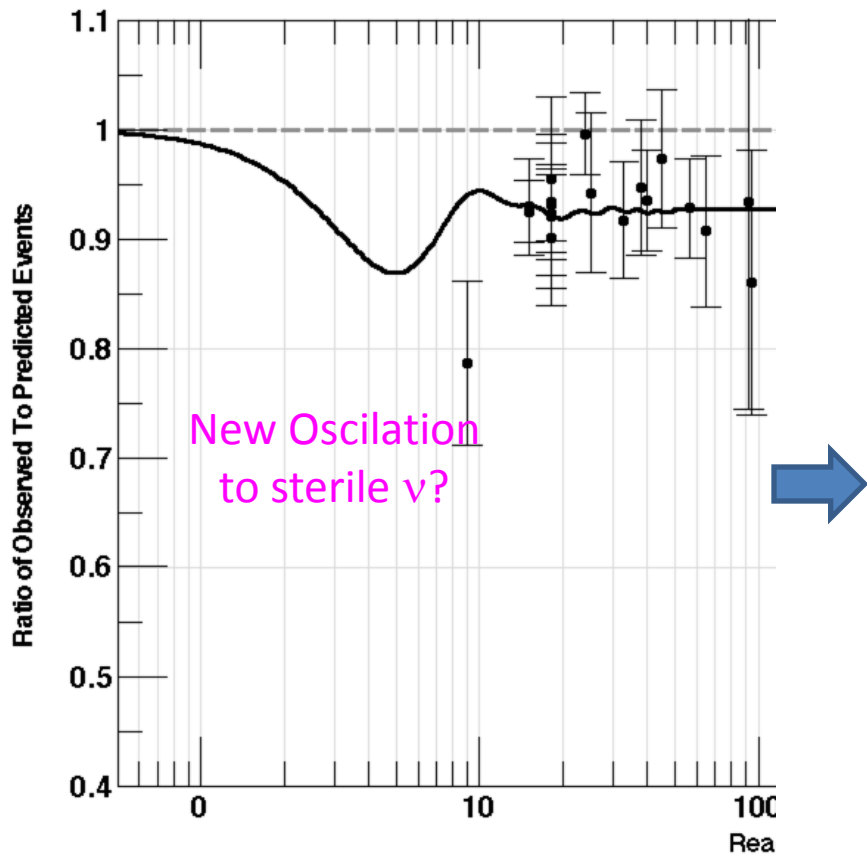
See session 12

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 ν_s
 - $\nu_\mu \rightarrow \nu_e = (\nu_\mu \rightarrow \nu_s) + (\nu_s \rightarrow \nu_e)$
- This then requires that there be ν_μ and ν_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

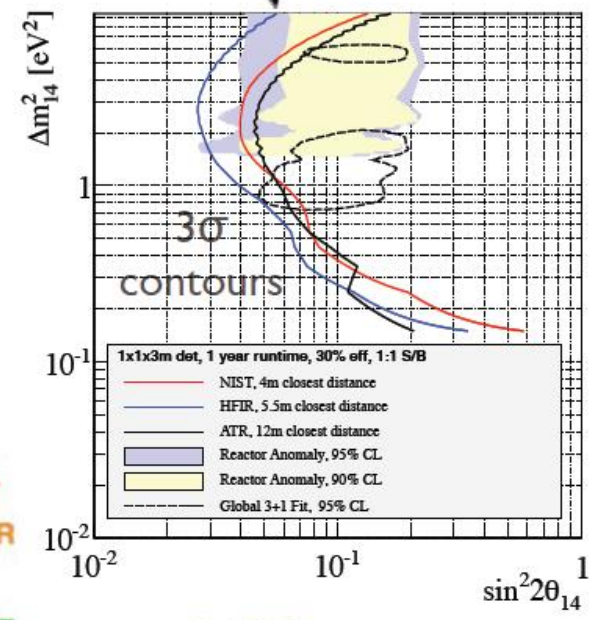


- Gaining consensus on one US-based effort

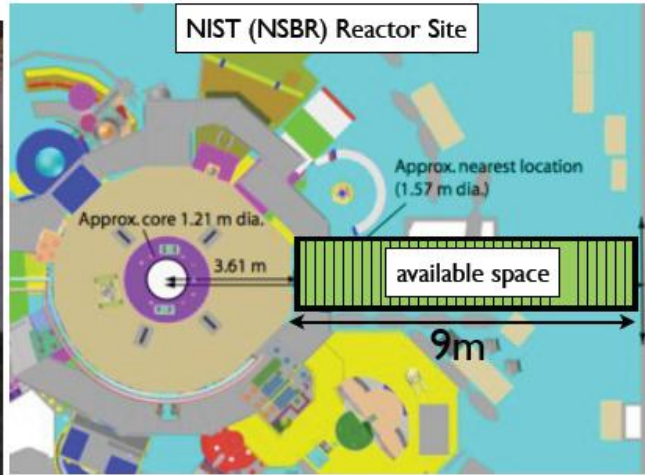
Heeger, Littlejohn, Mumm, et. al.
See poster here at NNNI2!



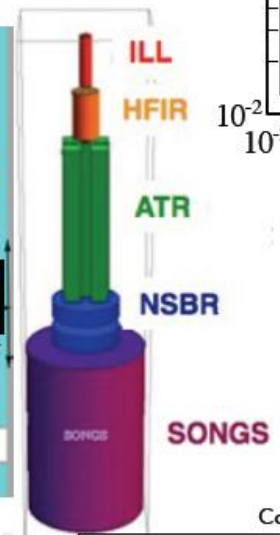
- Some sites have better available baseline: NIST
- Some sites have better thermal power: ATR
- Some site have smaller core size: HFIR
- US groups have significant experience building detectors for non-proliferation
- Also significant oscillation analysis experience



N. Bowden, SNAC 2011, Virginia Tech

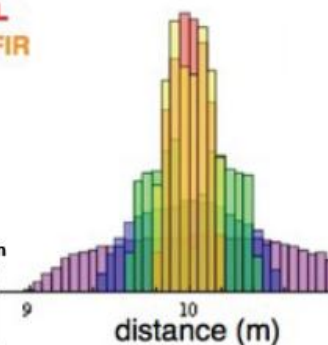


Courtesy of P. Mumm



Courtesy of M. Tobin

Core size comparison and baseline spread at 10m distance



Reactor Monitoring Experiments for Sterile ν Searches



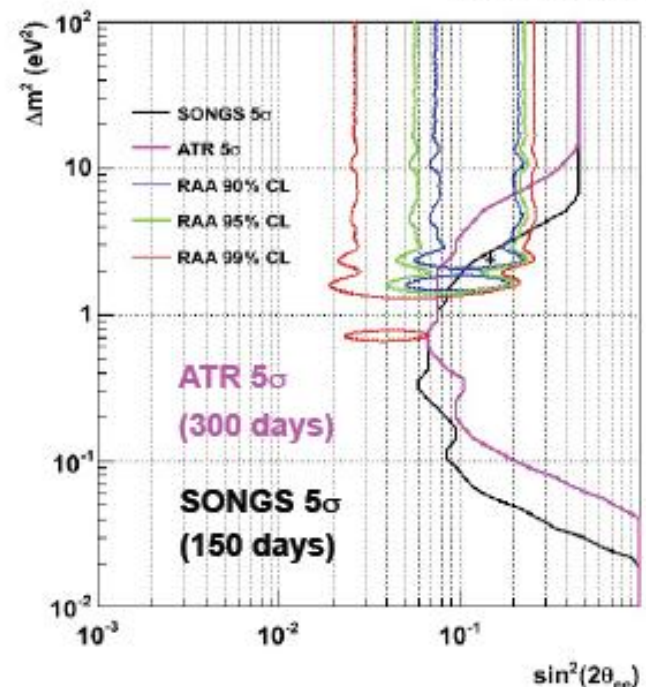
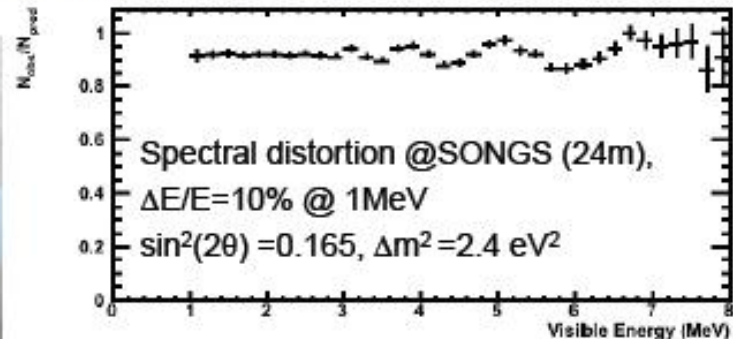
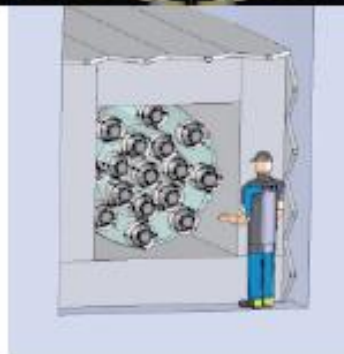
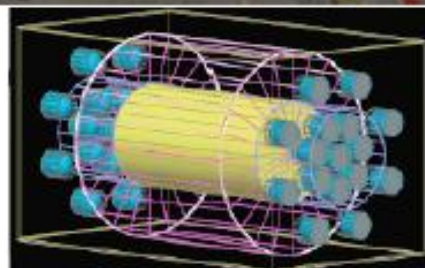
SCRAAM: Southern California Reactor Antineutrino Anomaly Monitor



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

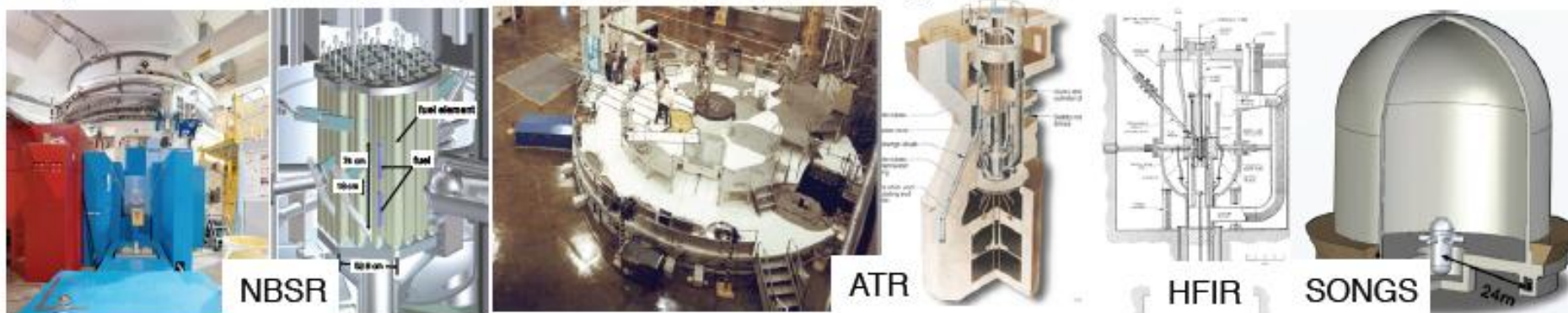


Ref: Bowden, poster 153-3

Opportunities with Reactor Neutrinos in the US

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

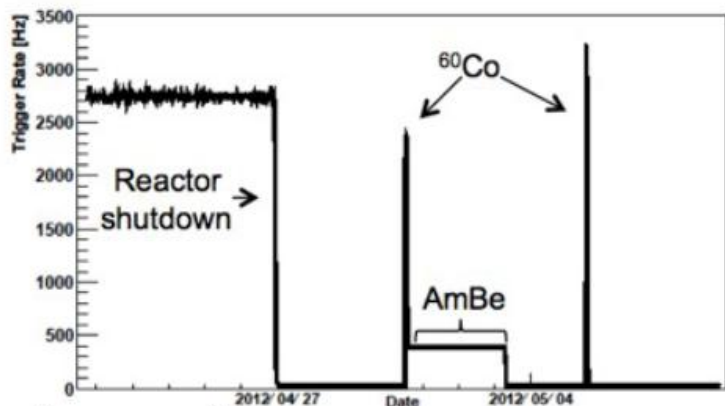
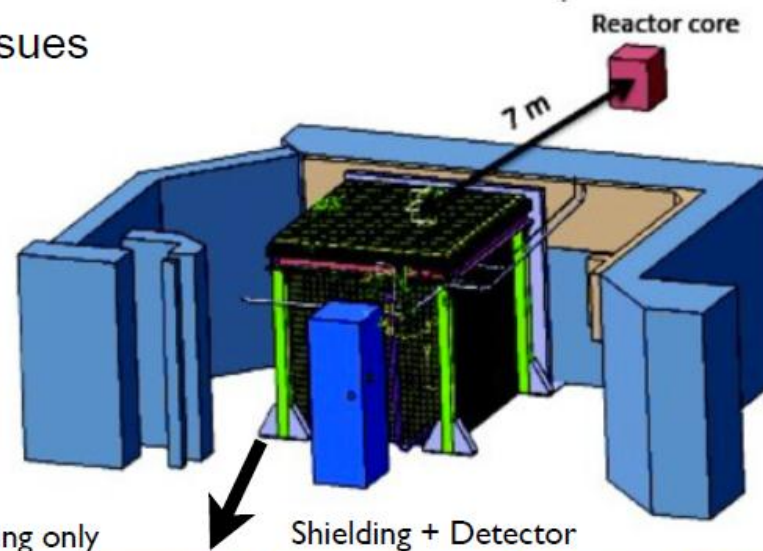
Worldwide Reactor Efforts: France



● 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



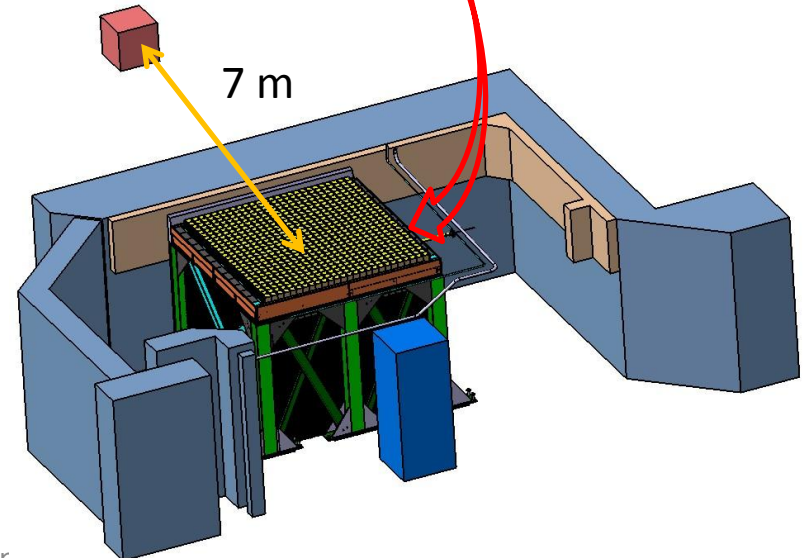
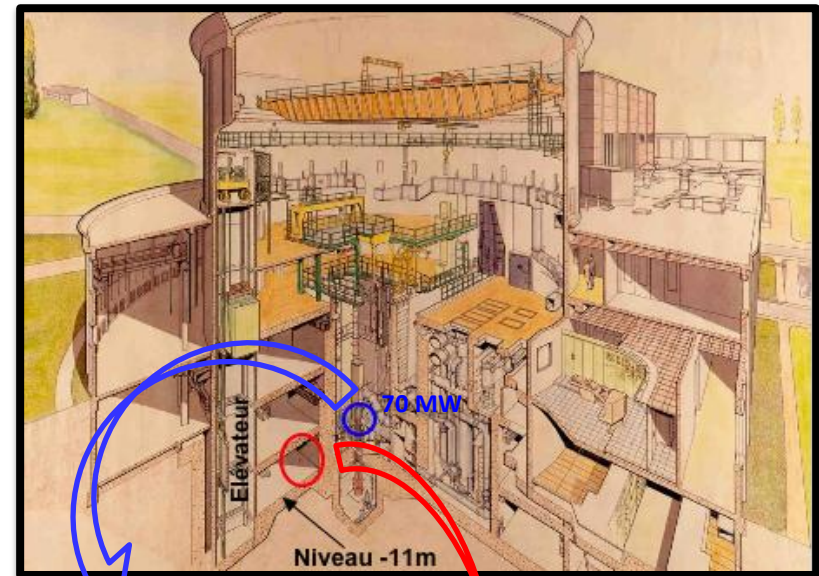
Figures courtesy of T. Lasserre



Nucifer experiment

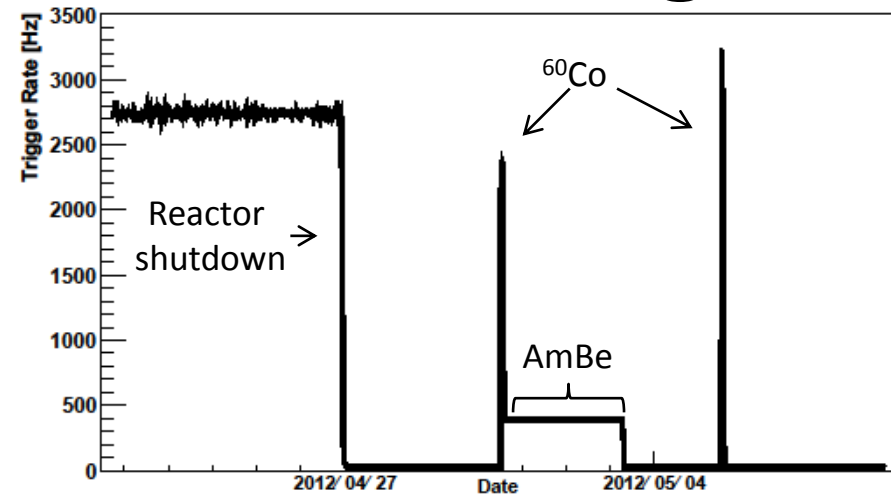
Contact: T. Lasserre,
D. Lhuillier, M. Fallot

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



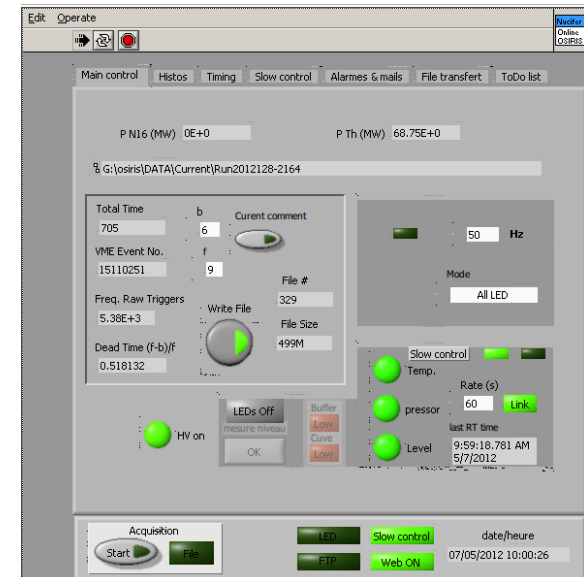
Commissioning and data taking

- 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 !**



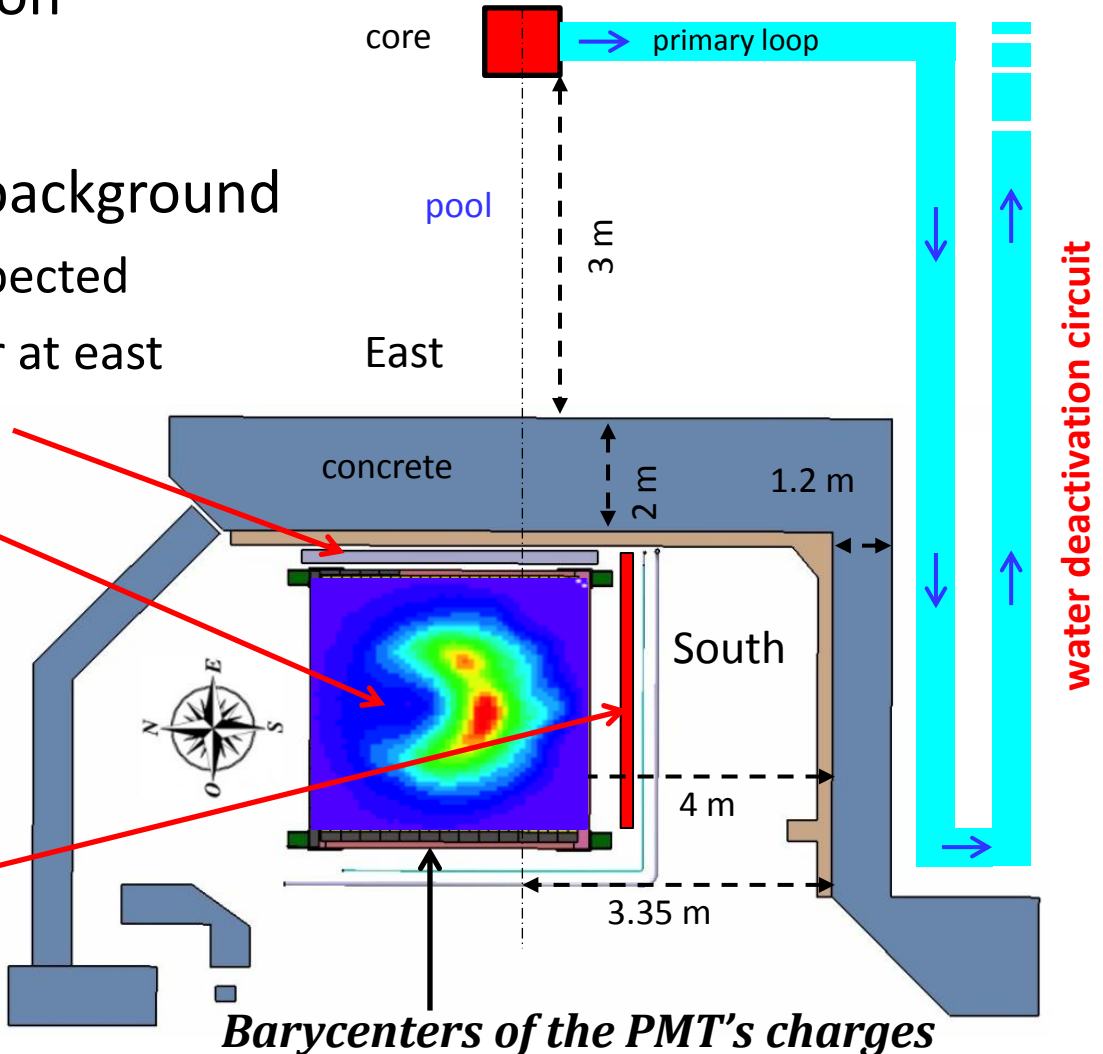
09/15/2012

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



Accidental background

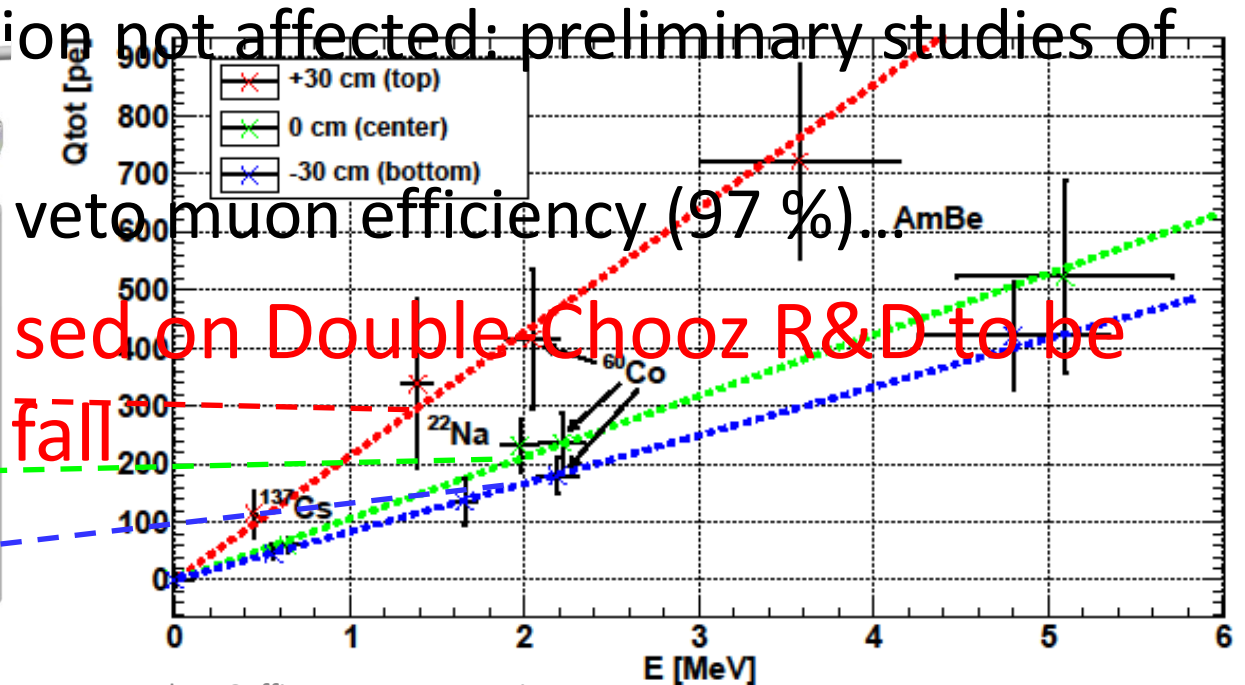
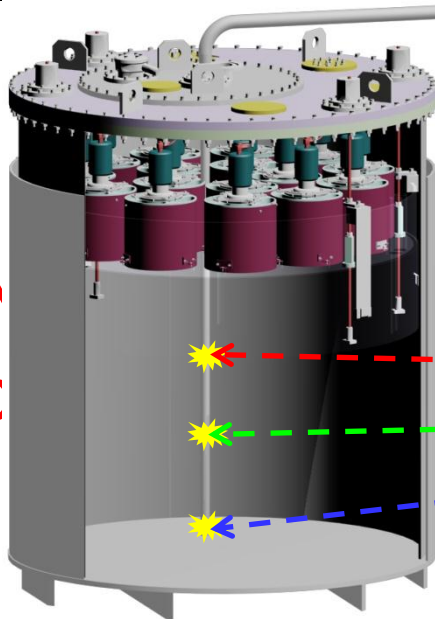
- Reactor OFF background on expectation
- Unexpected reactor ON background
 - ~10 times higher than expected
 - Point to south, but reactor at east
 - Lead front wall is efficient
 - Expected level at north
- Primary loop water activation
 - High energy γ leakage from ^{16}N
- New south lead wall
 - 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

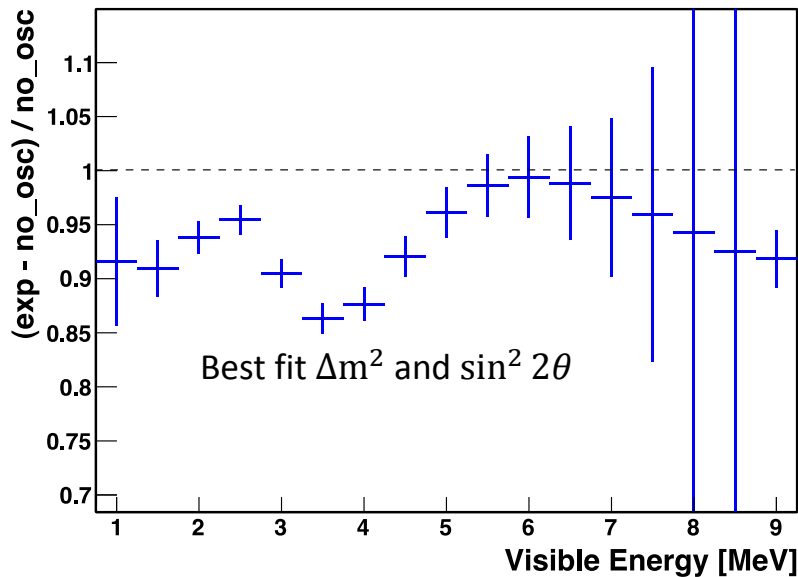
• μ
 p



Contour after upgrades

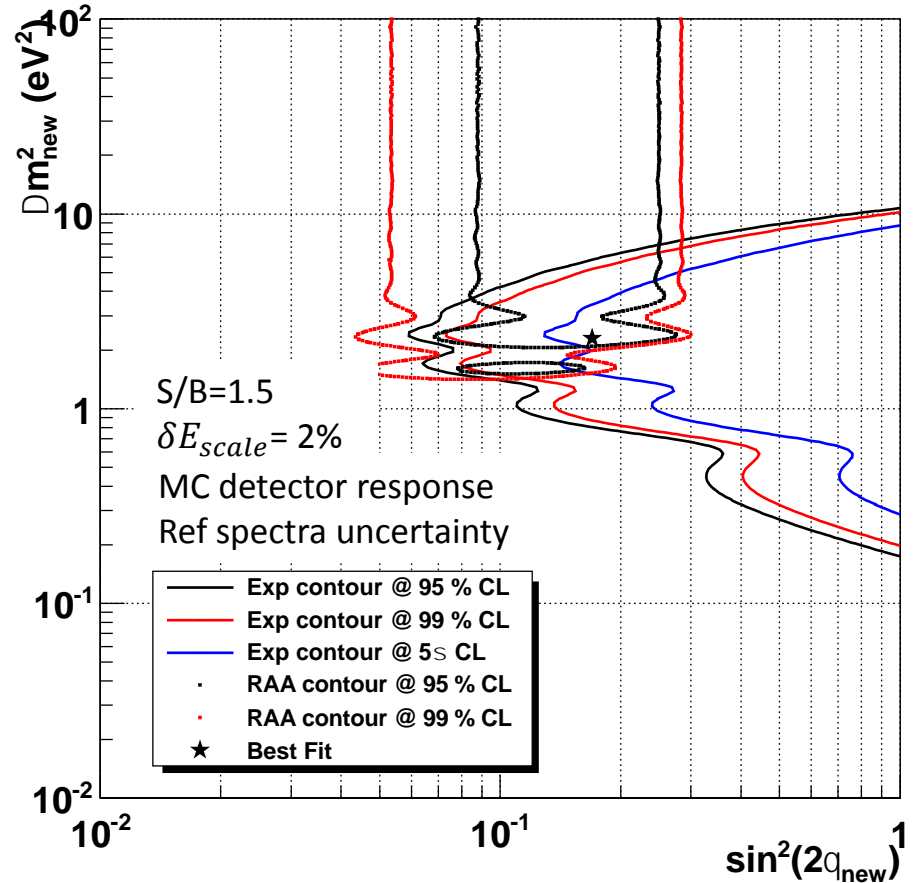
- Upgrades planned to be finished early 2013
- With upgrades:

300 days @ Osiris



Expected spectrum distortion

- Error stat only -

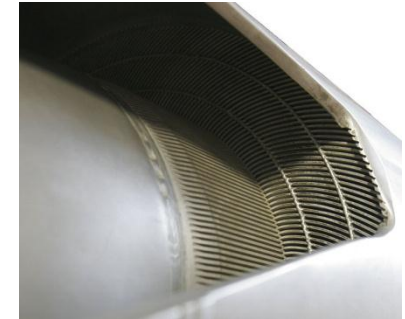
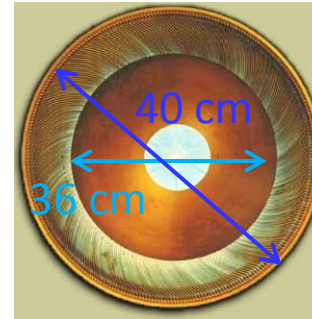


- If present, sterile ν hint possible

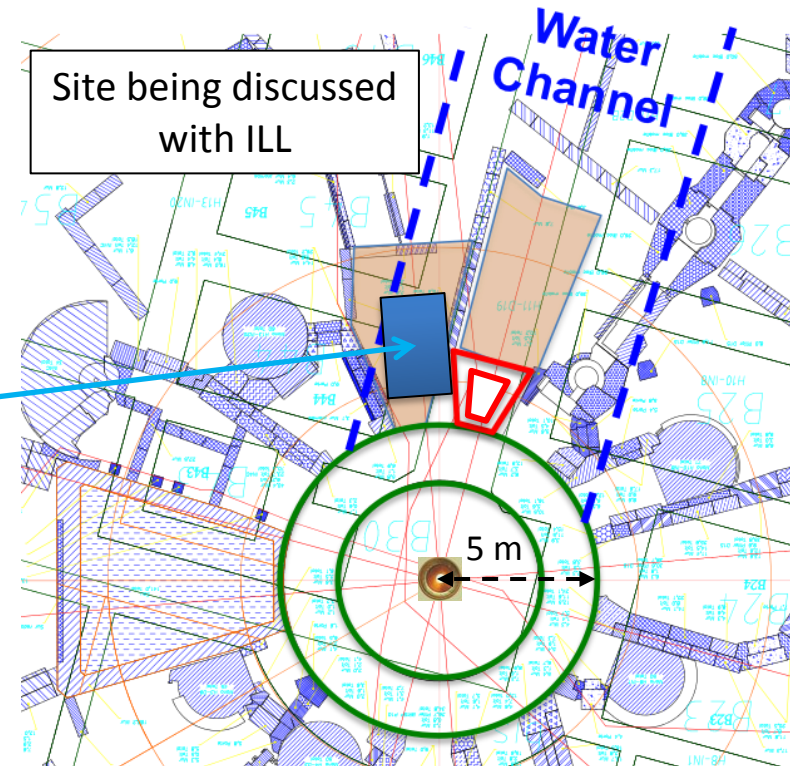
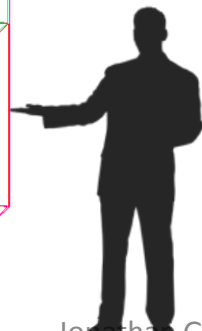
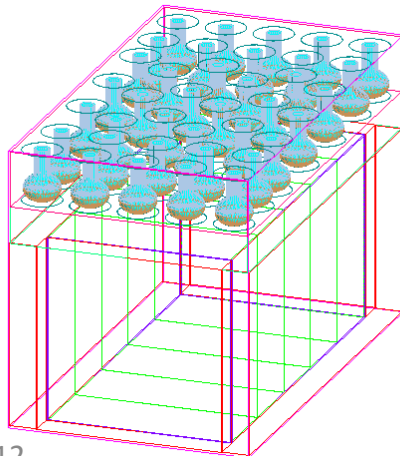
STEREO project

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 CH_2 and Pb walls (70 t)

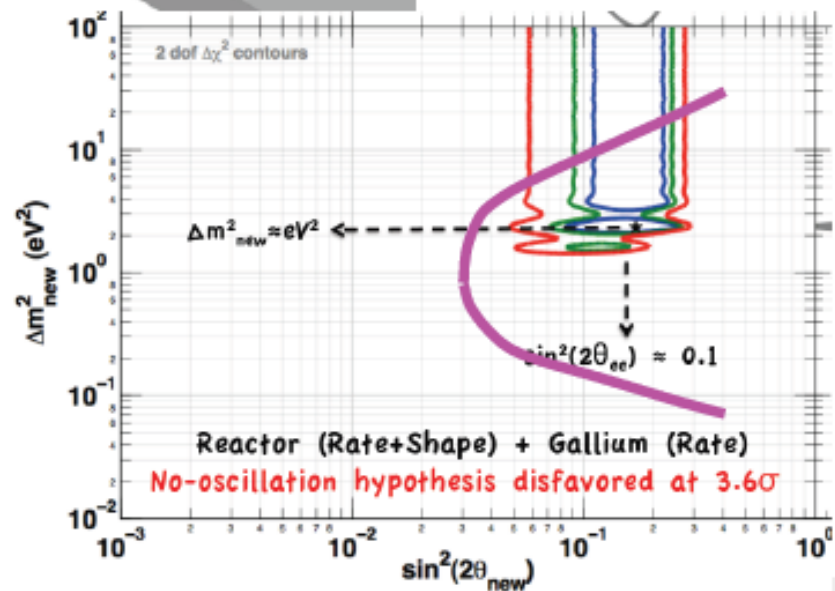
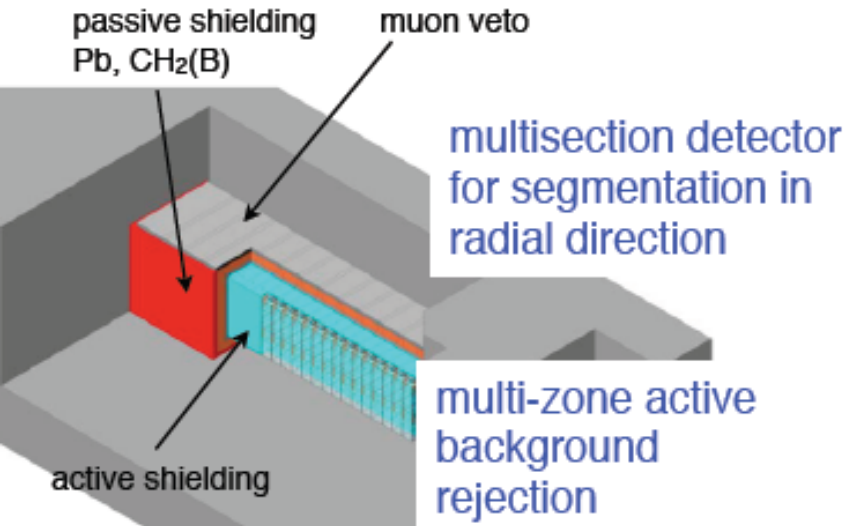


Target:
Gd-doped
liquid
scintillator

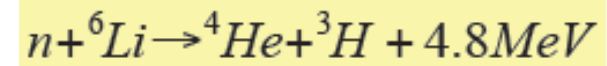
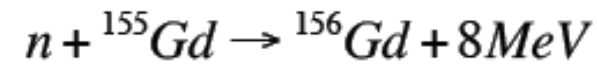
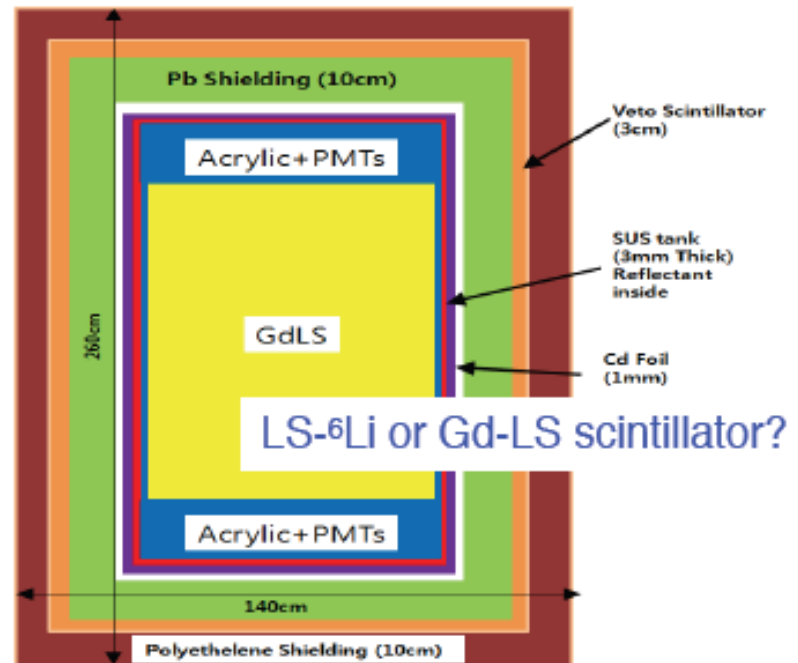


Worldwide Effort Towards Optimized Sterile ν Search

Neutrino4, Russia



Hanaro-SBL, Korea



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

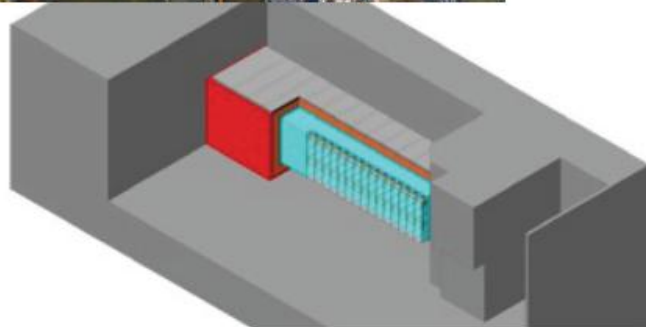
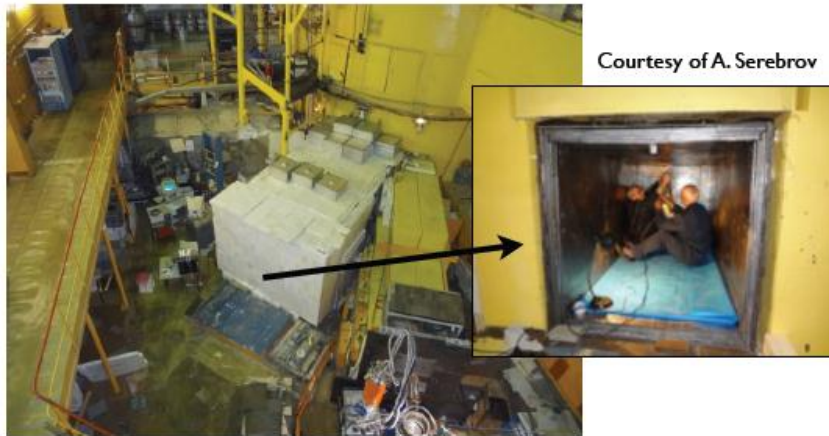
Worldwide Reactor Efforts: Russia



● Neutrino-4

A. Serberov, et. al.
arXiv:1205.2955

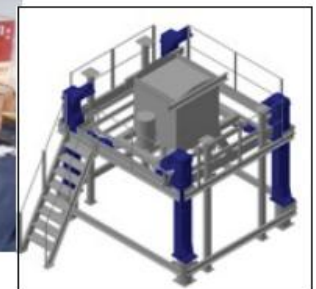
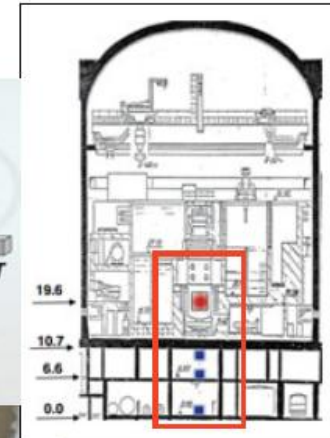
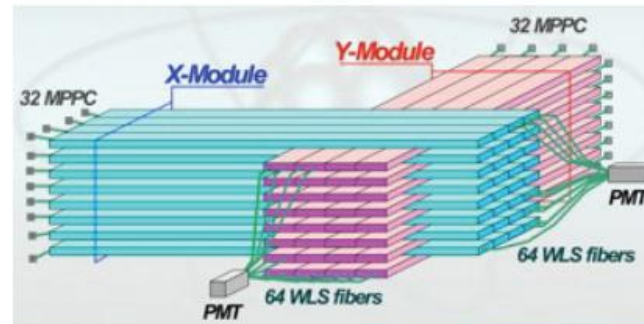
- Long, segmented detector, active shielding proposed
- Passive shielding built, characterized at 18 MW reactor
- Move to 100 MW reactor?



● DANSS

V. Egorov,
TAUP2011

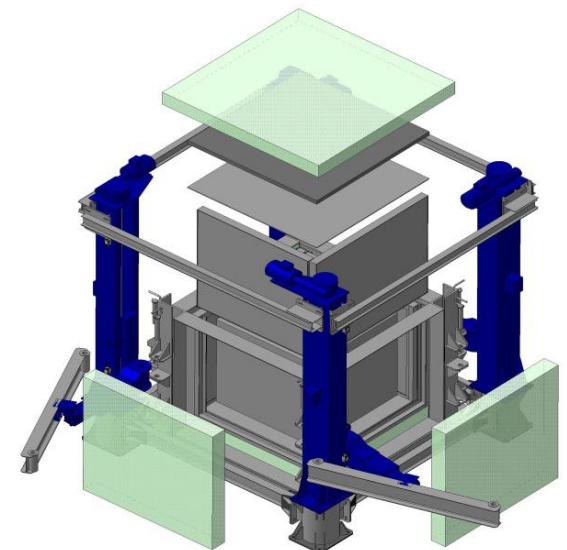
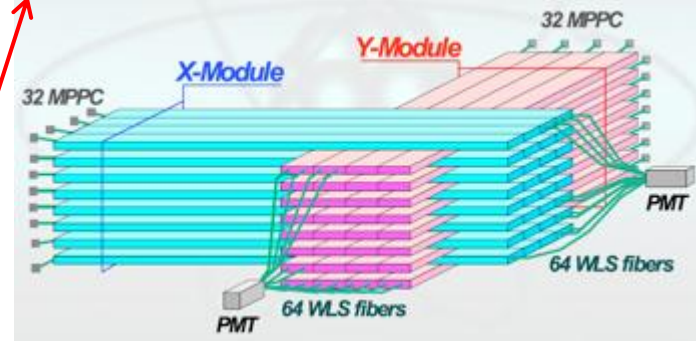
- At 3GW Commercial reactor
- Highly segmented solid scint detector being constructed - finish in 2012?
- Propose to use lift to move detector to different baselines



DANSS experiment

Contact: V. Egorov

- Kalinin NPP #4 reactor
 - 3 GW_{th} 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 m³ and ~10⁴ $\bar{\nu}_e$ / day



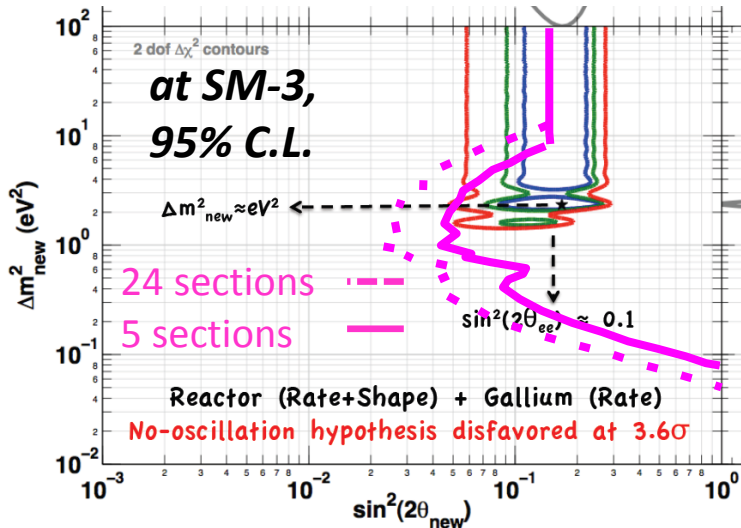
09/15/2012

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

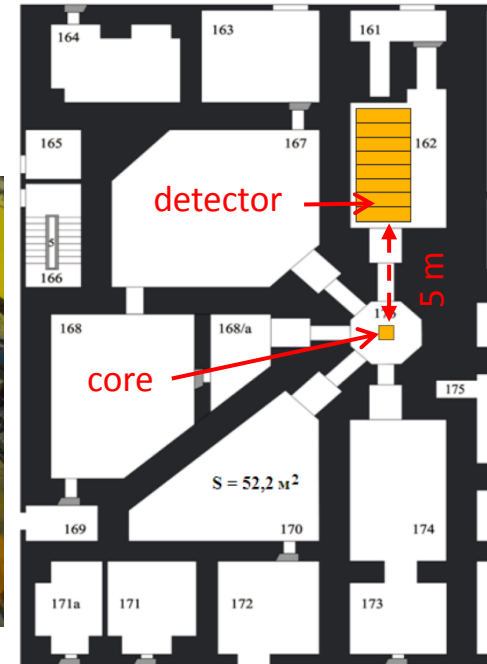
- Numerous tests with

NEUTRINO-4 experiment

- SM-3 reactor in Dimitrovgrad (Russia):
 - 100 MW compact core (35x42x42 cm³)
- 2 detector geometries currently studied:
 - 24 sections 1.4x1.0x1.0 m³
 - 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

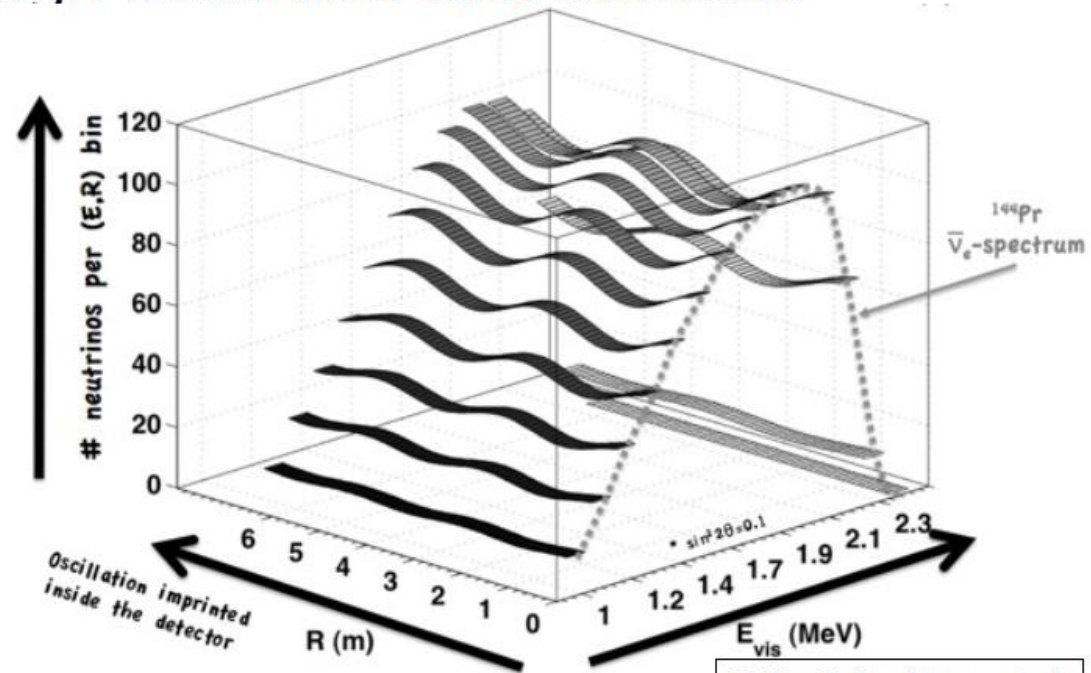
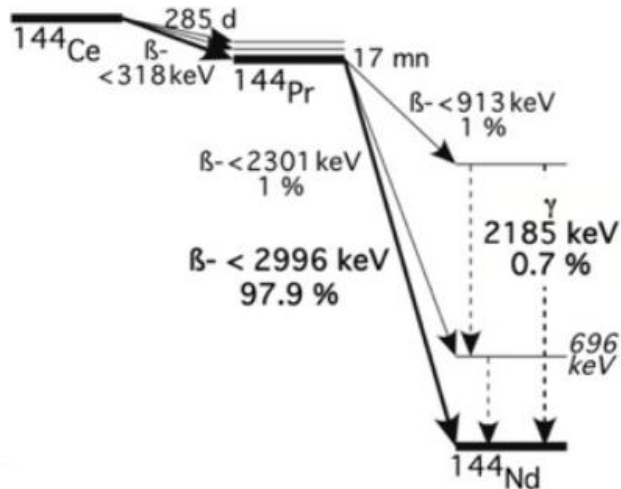
$\nu / \bar{\nu}$ Source Sterile Searches

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

Antineutrino Sources: ^{144}Ce - ^{144}Pr



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

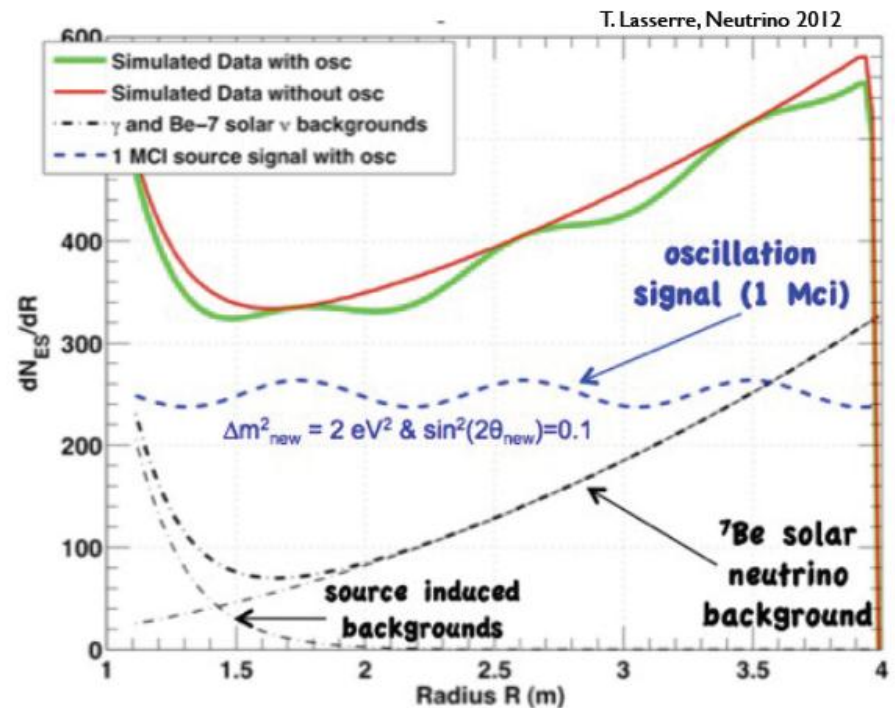
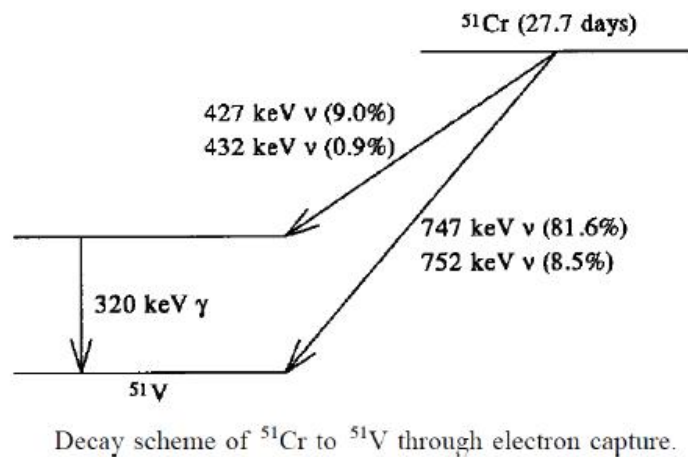


Cribier, Fechner, Lasserre, et al.,
PRL 107 201801 (2011)

Neutrino Sources: ^{51}Cr



- ^{51}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

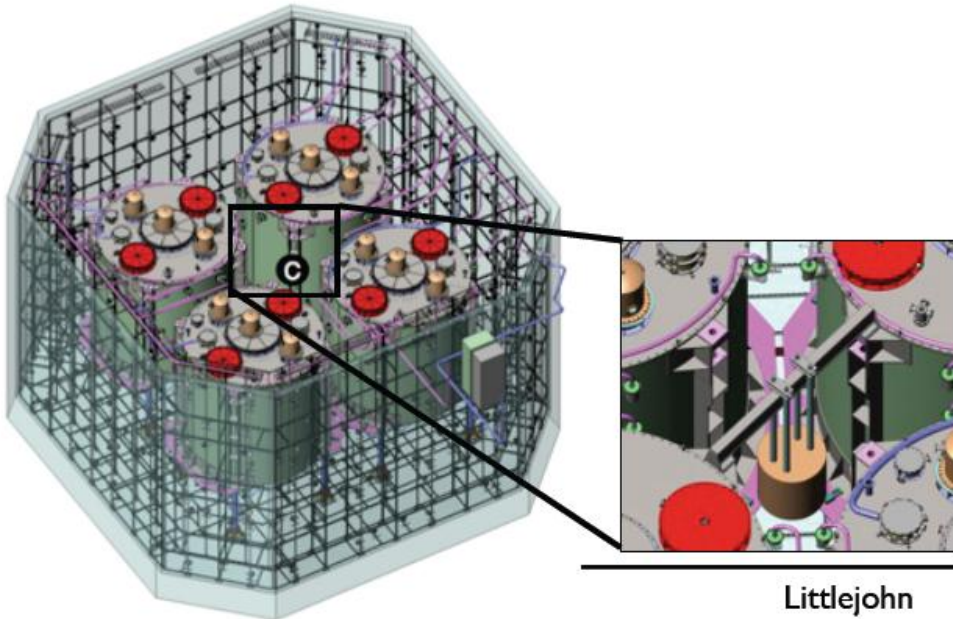
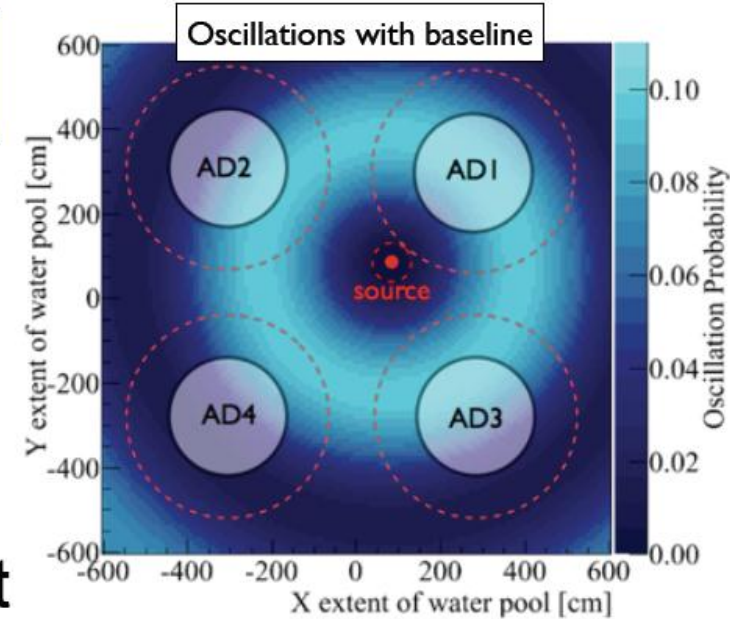


Daya Bay Source Experiment

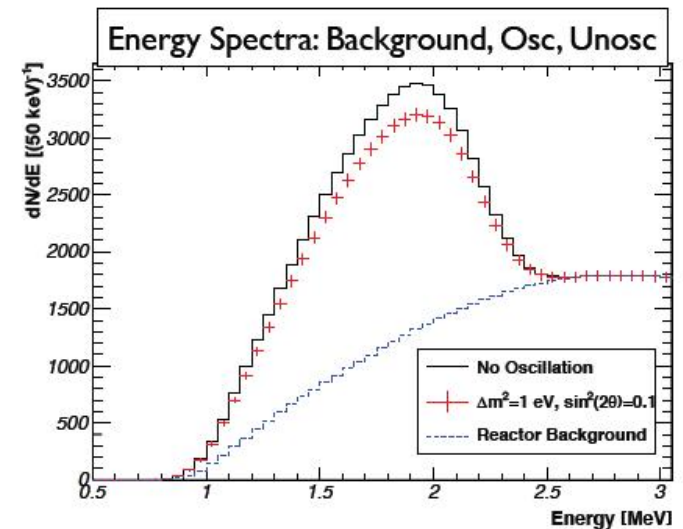


- 0.5 MCi ^{144}Ce source
 - 35,000 events/year
 - 35 cm tungsten shielding
- 'Easy' deployment in far hall water pool: detectors undisturbed
 - Multiple source locations to check osc behavior
- Could install after θ_{13} measurement

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



Littlejohn



CeLAND



- 0.05 MCi ^{144}Ce source

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

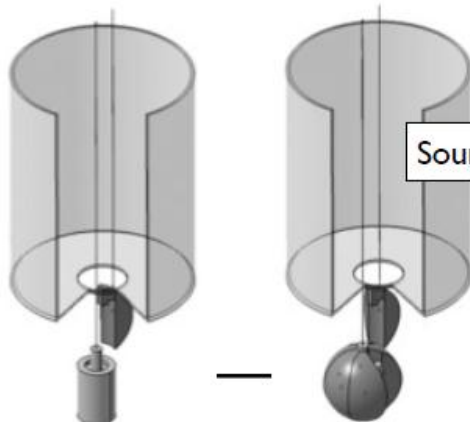
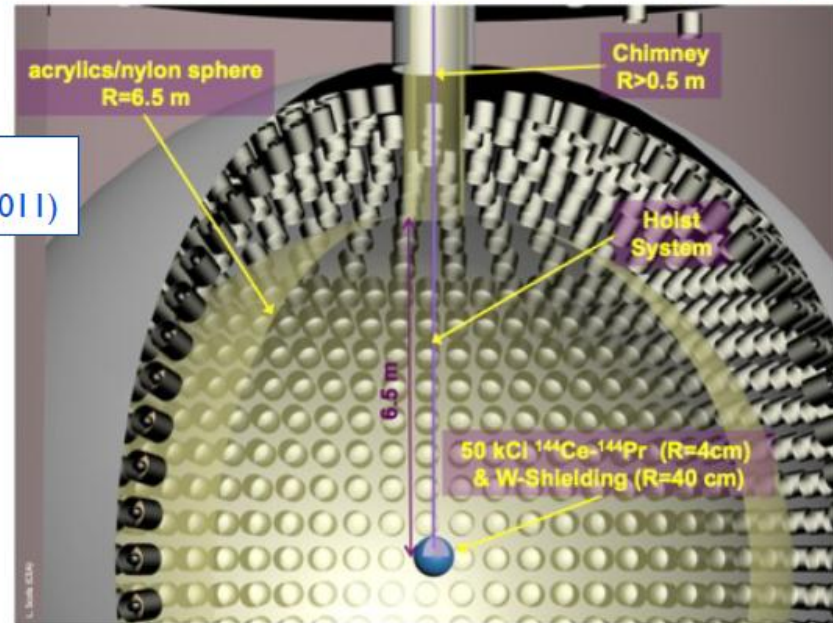
Cribier, et. al.,
PRL 107 201801 (2011)

- Deployed inside detector

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

- Conflicts with KamLAND-Zen

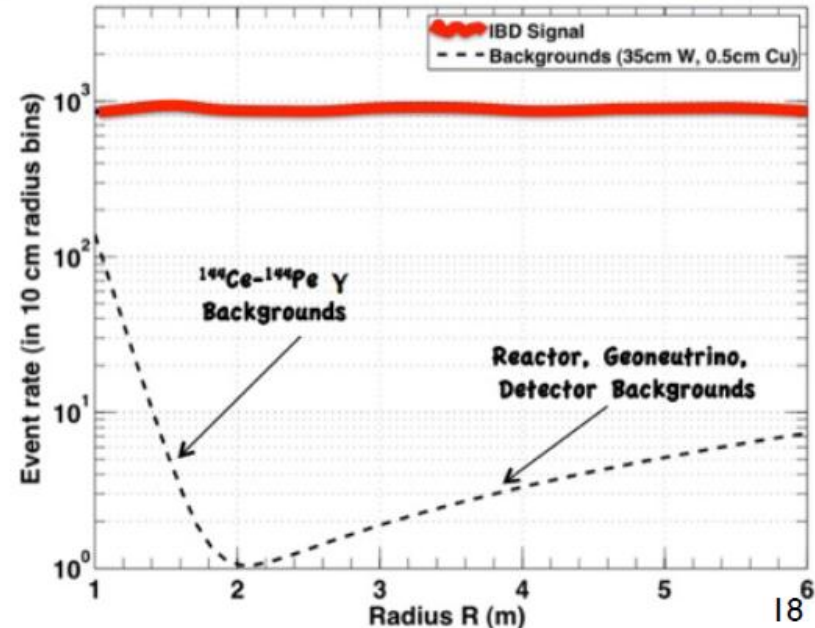
- Schedule after 2015 will be clearer after October collaboration meeting



Source - shielding Deployment

October

Littlejohn

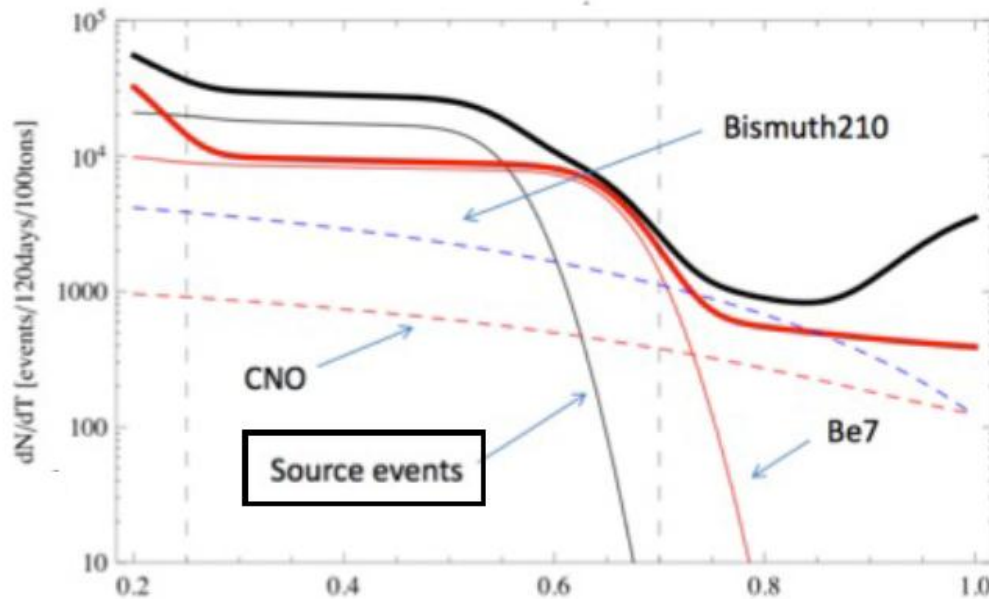
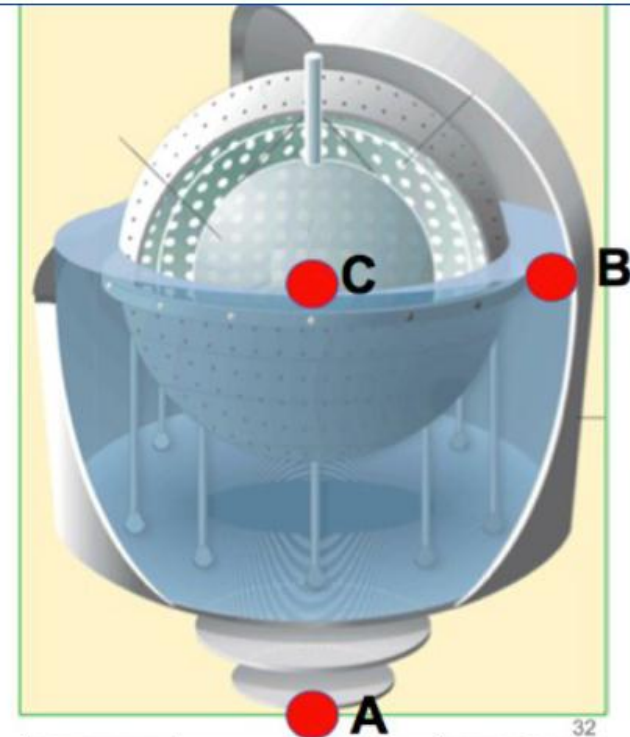


Borexino



- 0.05 M Ci ^{144}Ce source at center
 - Like CeLAND; not until after 2015
- ~ 10 M Ci ^{51}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



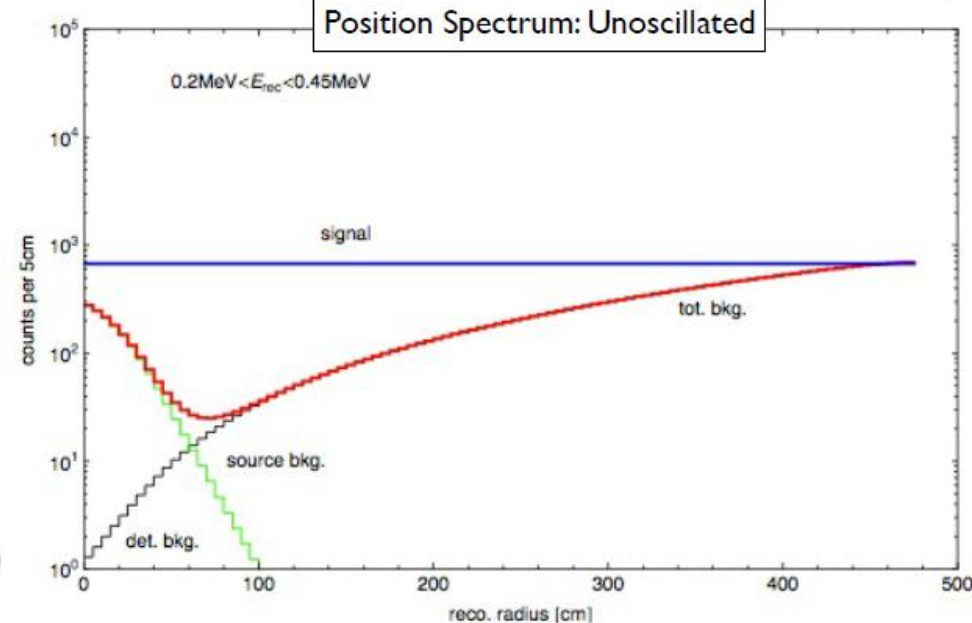
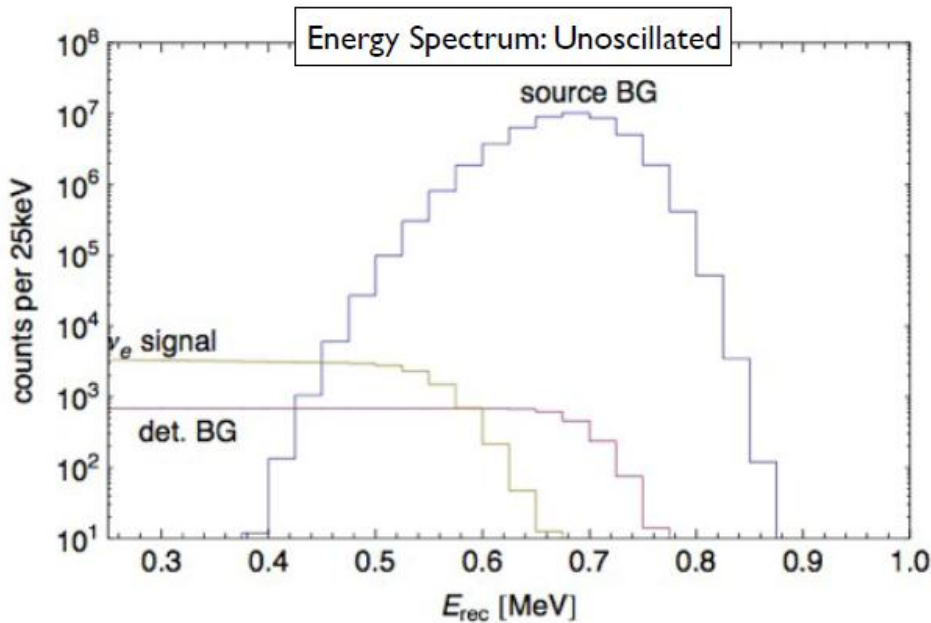
- 1+ MCi ^{51}Cr source inside SNO+

- 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



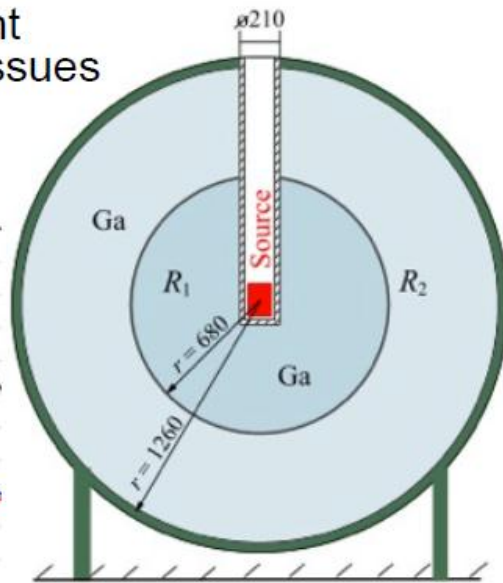
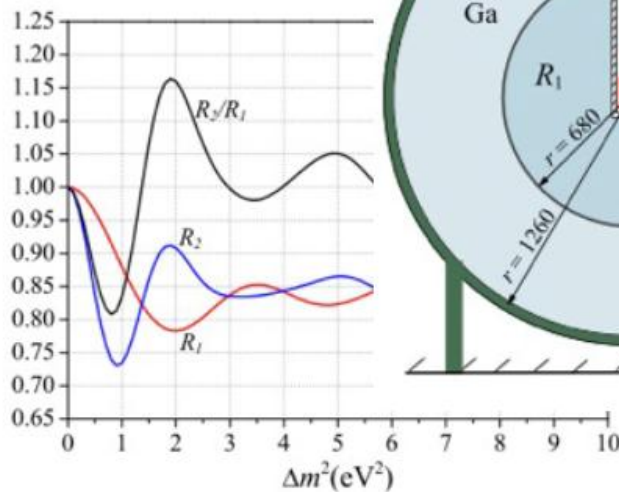
Other Worldwide Reactor Efforts



● SAGE 2

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

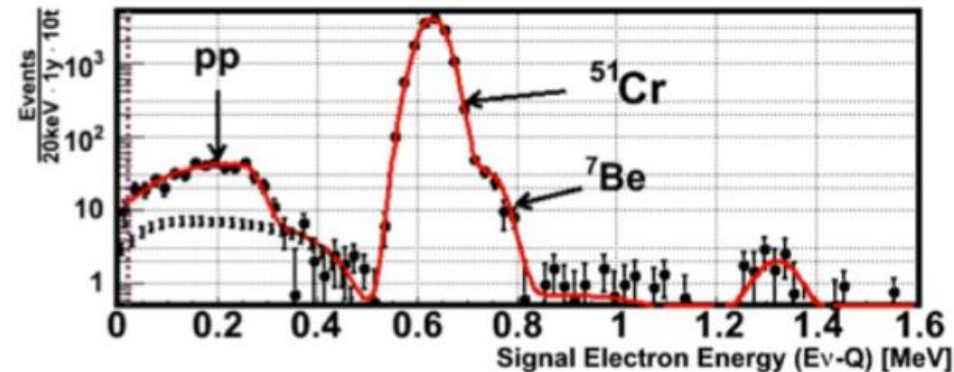
- Re-do SAGE ^{51}Cr calibration with a 2-zone detector
- 3 MCi source
- Measure relative rate differences between zones
- Significant funding issues



● LENS Sterile

See LENS Collab. in Sterile Nu White Paper

- 10 MCi ^{51}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

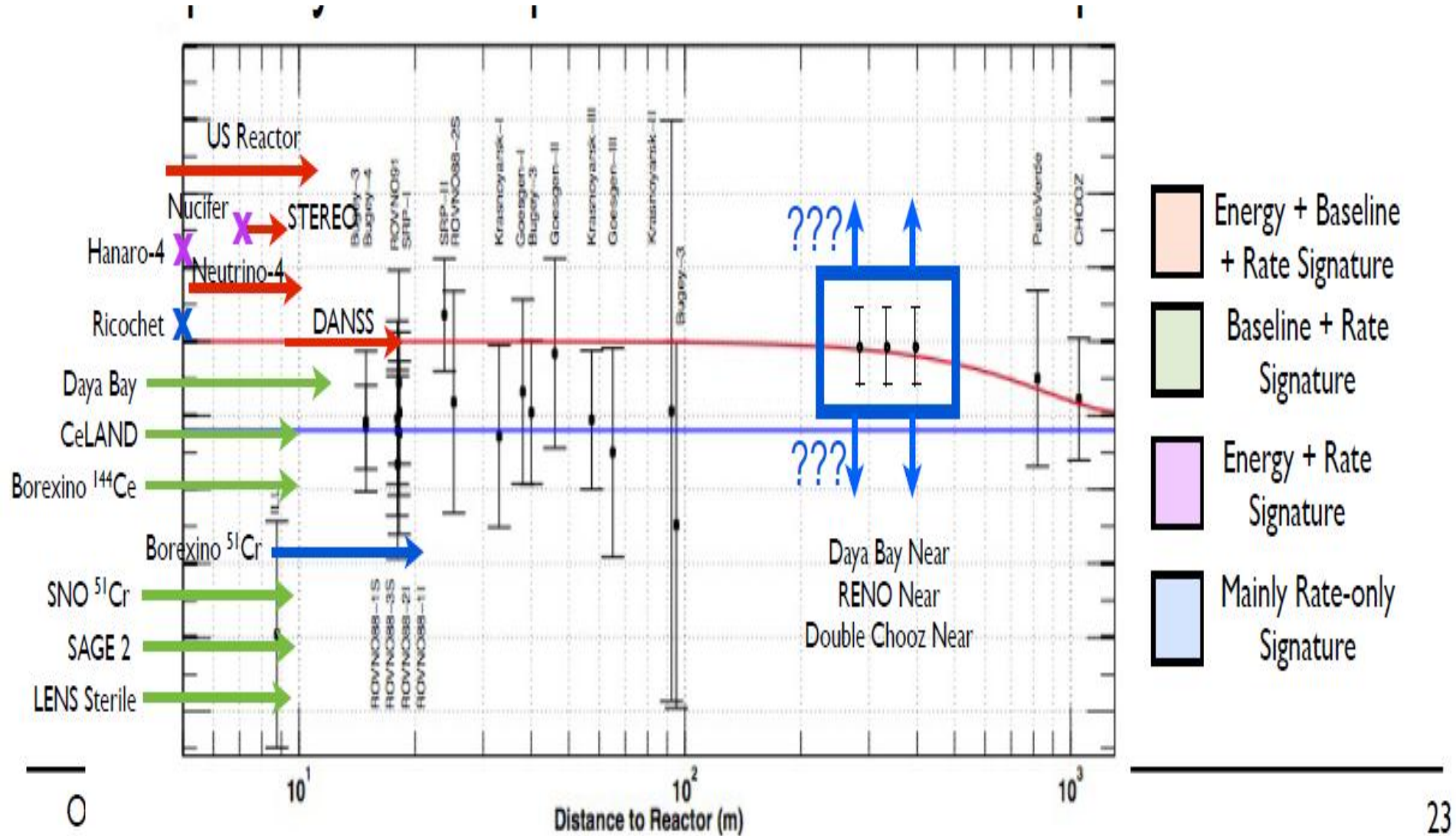


****NOTE** - All dates are estimates - most proposals have no funding yet!**

	Experiment	2013	2014	2015	2016	2017+	
Reactor	US Reactor	???					<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="margin-bottom: 10px;"> Energy + Baseline + Rate Signature</div> <div style="margin-bottom: 10px;"> Baseline + Rate Signature</div> <div style="margin-bottom: 10px;"> Energy + Rate Signature</div> <div> 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 θ_{13} running xxx					
	CeLAND	xxx KamLAND-Zen running xxx			???		
	Borexino ^{144}Ce	xxx Solar nu running xxx		???			
Nu Source	SNO+ ^{51}Cr		xxx Nd phase running xxx		???		
	LENS Sterile	Not sure... 'new' technology, so much R&D remaining					
	Borexino ^{51}Cr	???					

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

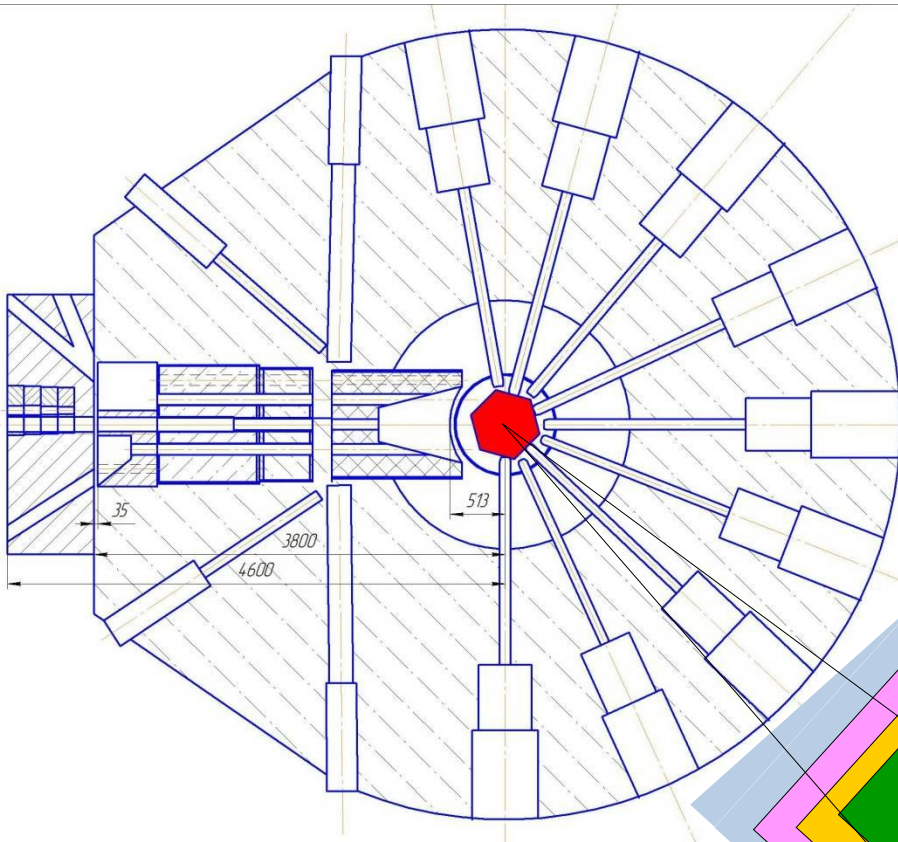
14 реакторных экспериментов на старте



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

*в ПИЯФ,
и на СМ-3
(выбор стратегии)*

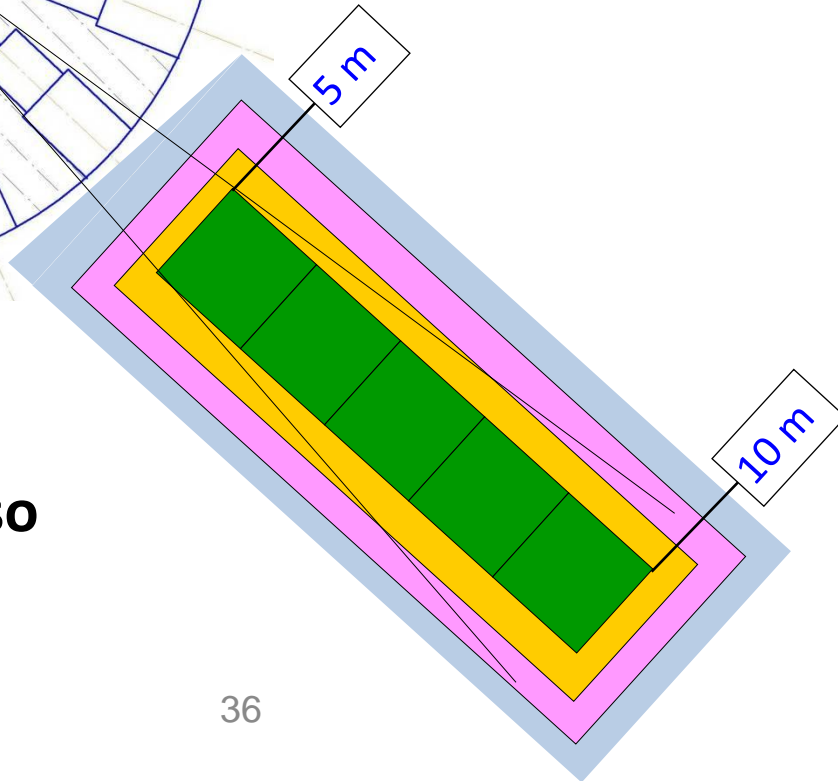
Possible scheme at WWR-M reactor PNPI



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

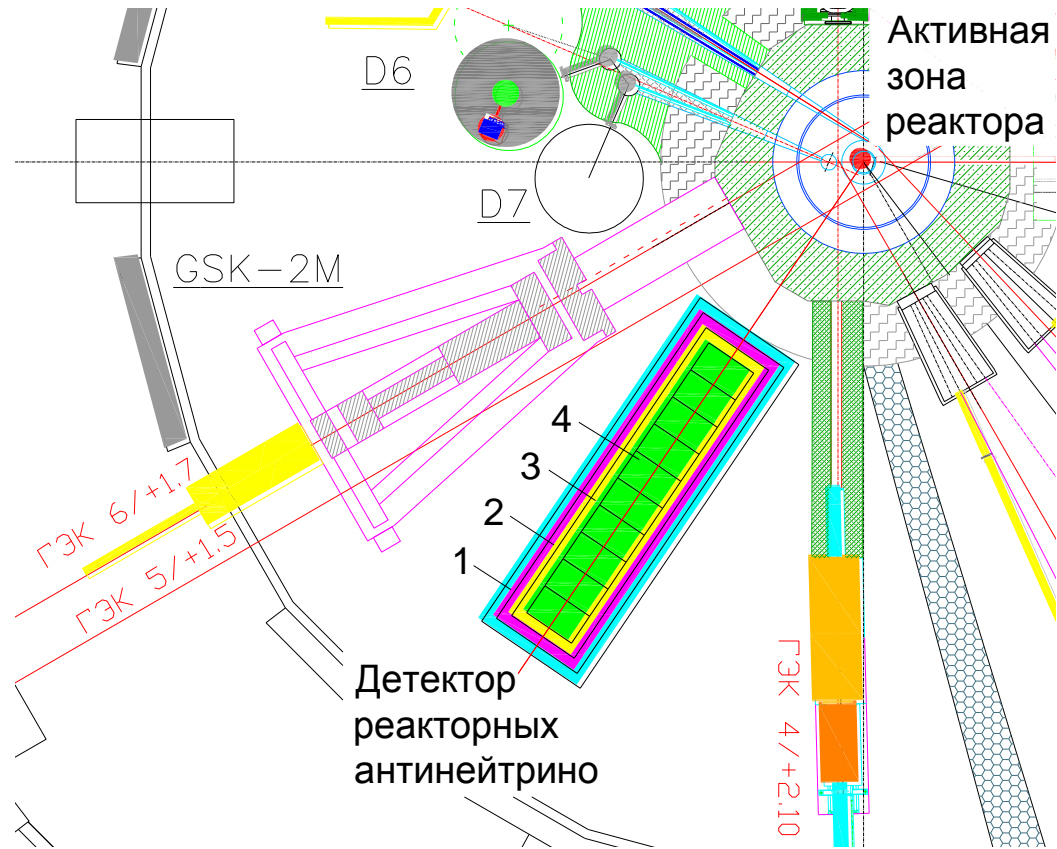
Experimental base 5 – 10 m

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



Possible scheme at PIK reactor in PNPI

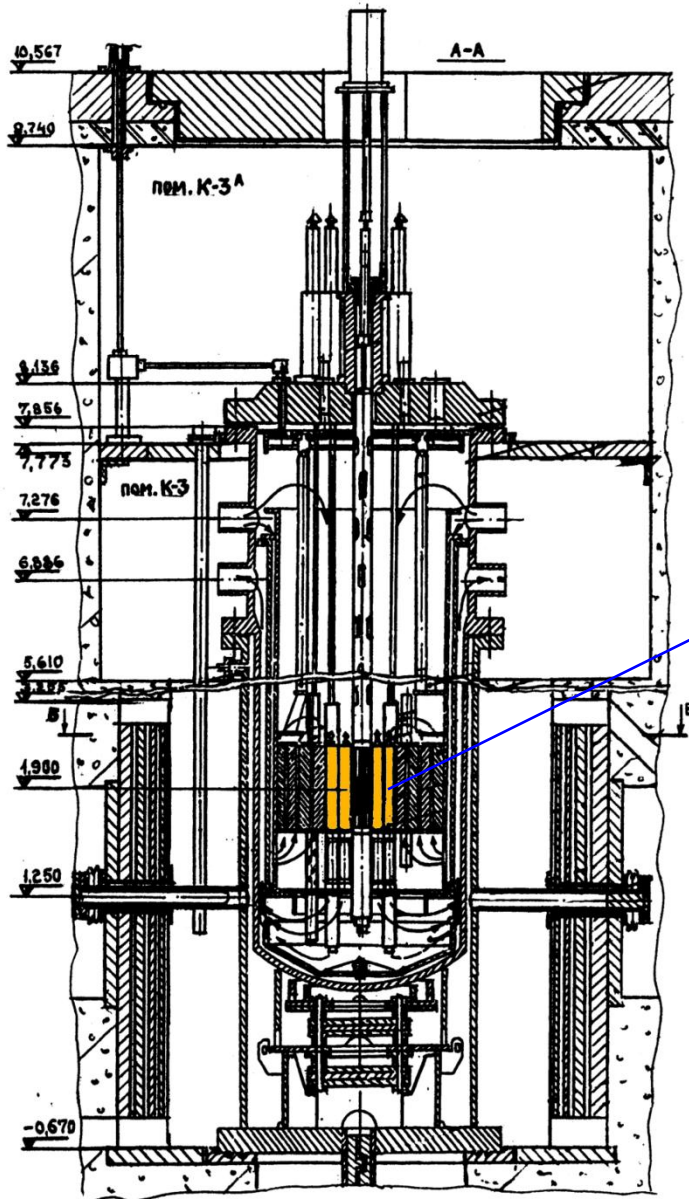
Reactor power 100MW, Size of reactor core $0.5 \times 0.5 \text{ m}^3$,
minimal distance 5 m, experimental base from 5 m to 15 m



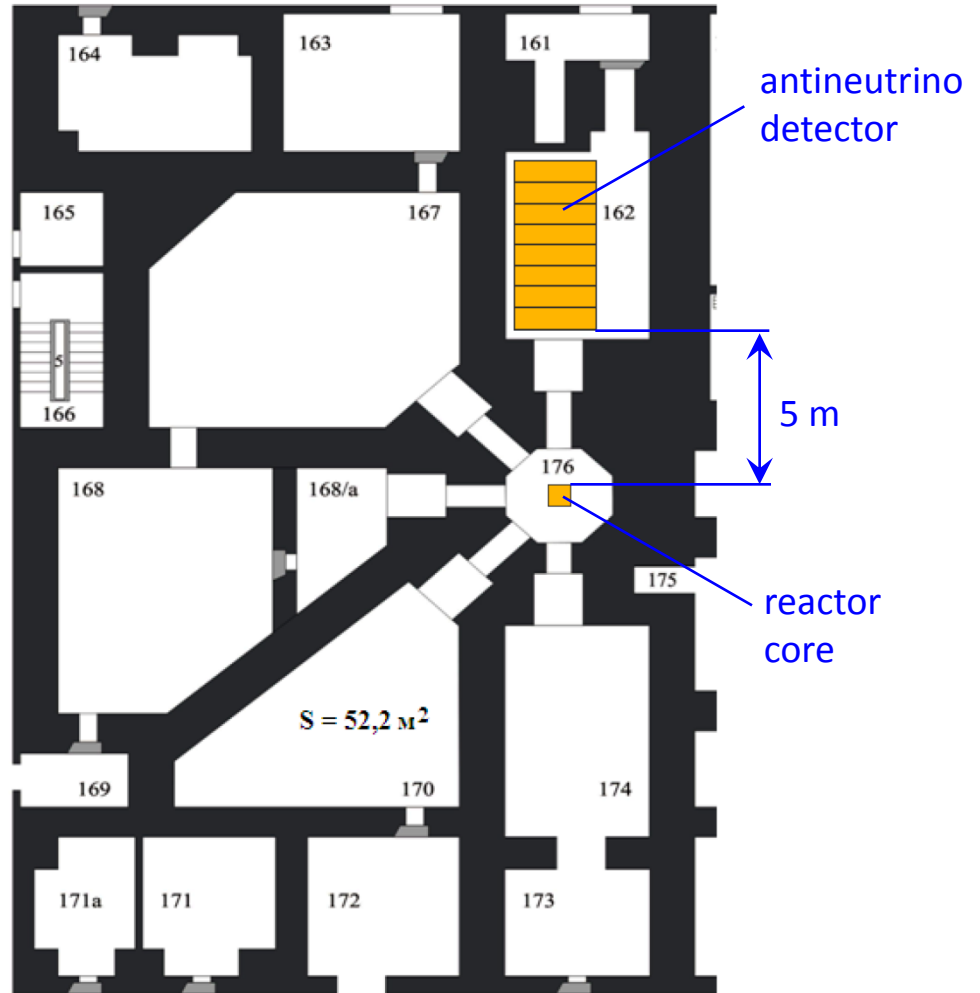
Position of multi-section detector in experimental hall of reactor PIK
Shielding: 1 – muon veto, 2 – Pb, 3 – $\text{CH}_2 + \text{B}$, 4 – scintillator.

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



reactor core

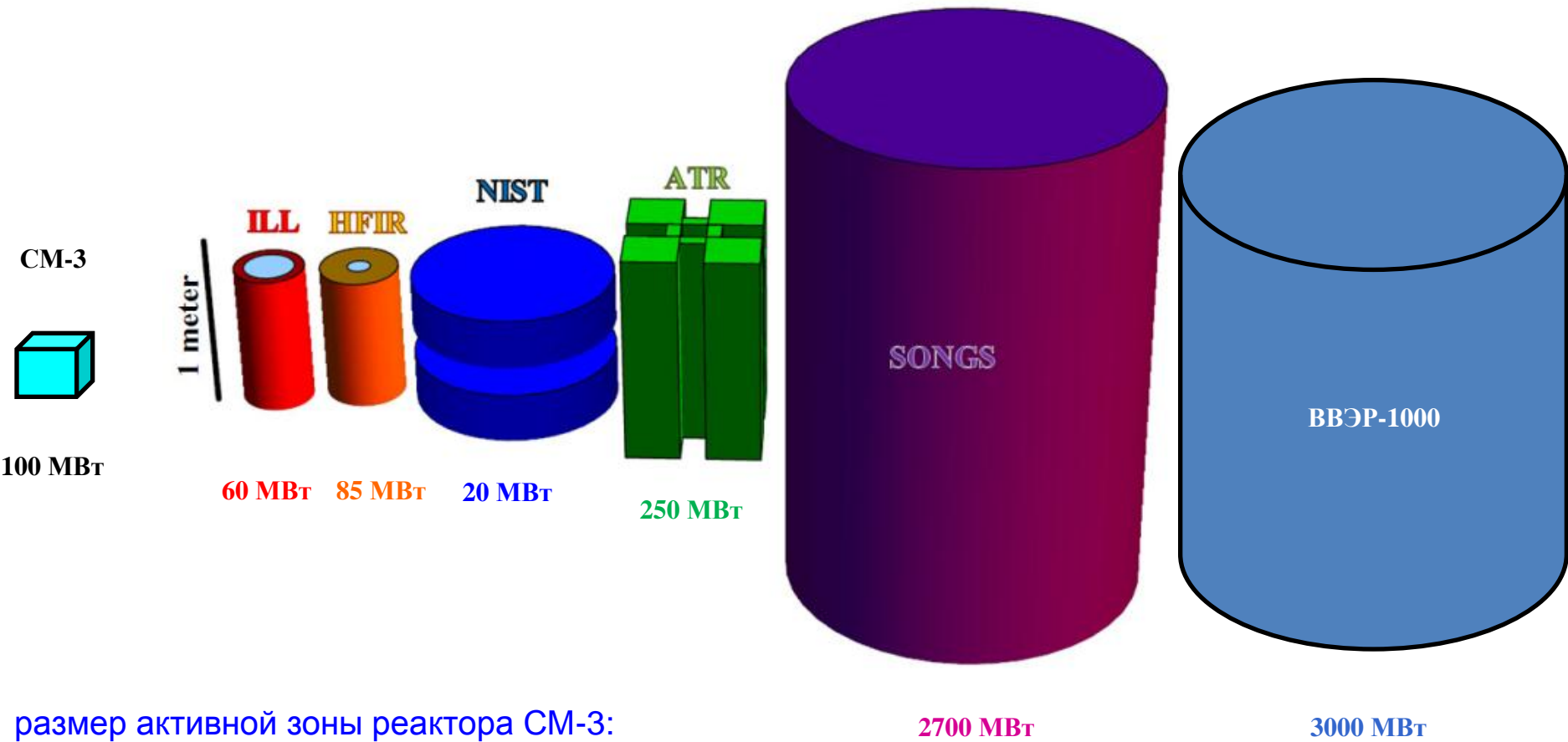


antineutrino detector

5 m

reactor core

Размеры активных зон и мощность реакторов



размер активной зоны реактора CM-3:
 $42 \times 42 \times 35 \text{ см}^3$

Number of expected events per 1m³ of scintillator for efficiency of registration 50%

	R = 5 m	R = 10 m	Accuracy per 1 year /1m³
WWR-M (16 MW) core 0.6x0.7x0.7m ³	300 counts/day·m ³	75 counts/day·m ³	0.6% - 1.1% (at 5 - 10 m)
SM-3 (100 MW) core 0.35x0.4x0.4 m ³	1750 counts/day·m ³	435 counts/day·m ³	0.2% - 0.4% (at 5 - 10 m)
PIK(100 MW) core 0.5x0.5x0.5 m ³	1750 counts/day·m ³	435 counts/day·m ³	0.2% - 0.4% (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 $0.6 \times 0.7 \times 0.7 \text{ m}^3$	2 - 20 ($\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)	13×10^{-4} ($\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)
SM-3 (100 MW) core $0.35 \times 0.4 \times 0.4 \text{ m}^3$	5×10^{-4} ($\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)	

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

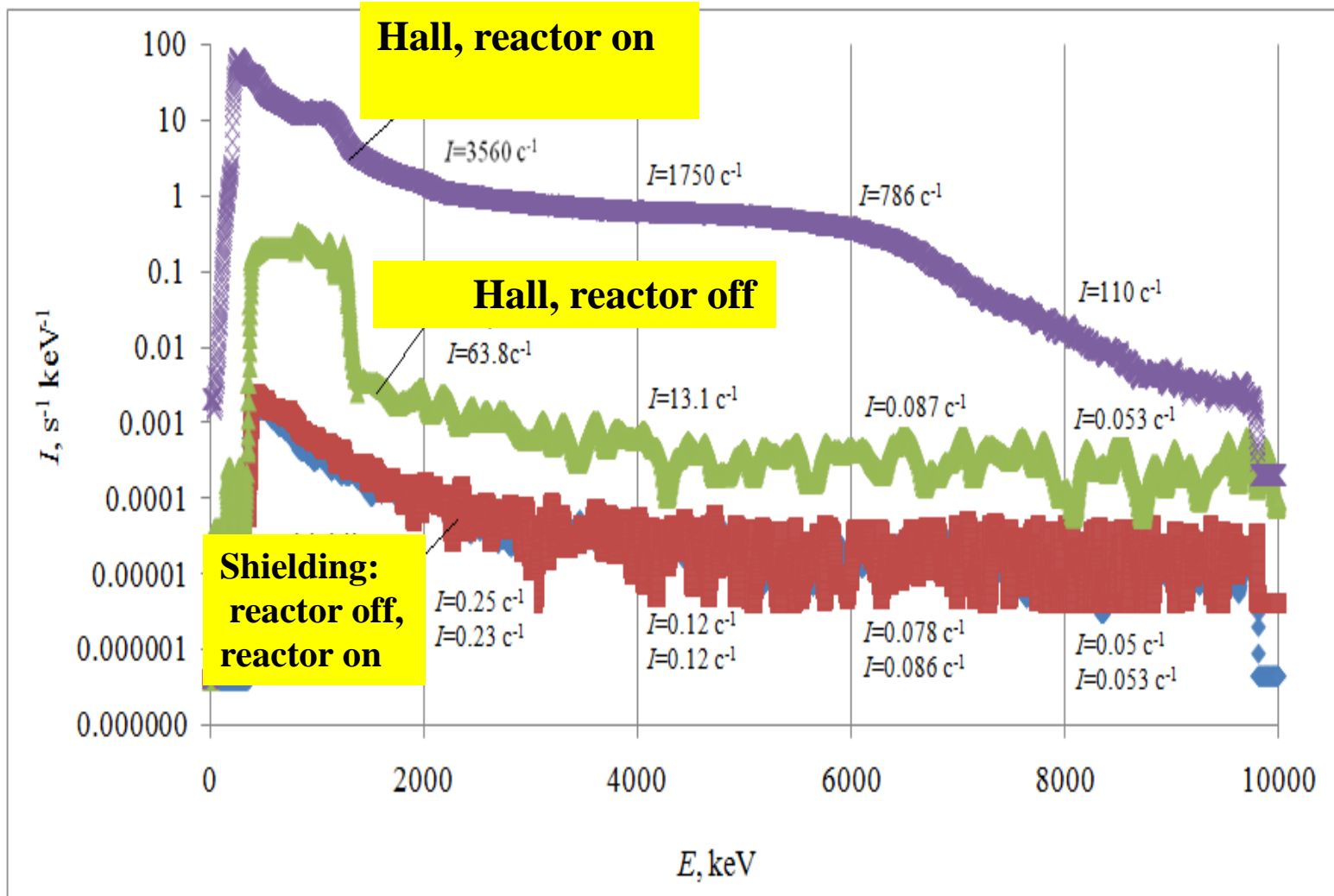


Concrete shielding + Lead shielding + (CH₂ + B)



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 (CH₂ + B, concrete, Pb +B) **Shielding factor - 10⁴ - 10⁵**

	flux of thermal neutrons (n/cm ² ·s) (reactor on)	flux of thermal neutrons (n/cm ² ·s) (reactor off)
WWR-M (16 MW) core 0.6x0.7x0.7m ³	8.9 × 10⁻⁵ neutrons (n/cm ² ·s) (with shielding)	4.5 × 10⁻⁵ neutrons (n/cm ² ·s) (with shielding)
SM-3 (100 MW) core 0.35x0.4x0.4 m ³	5 × 10⁻⁴ neutrons (n/cm ² ·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

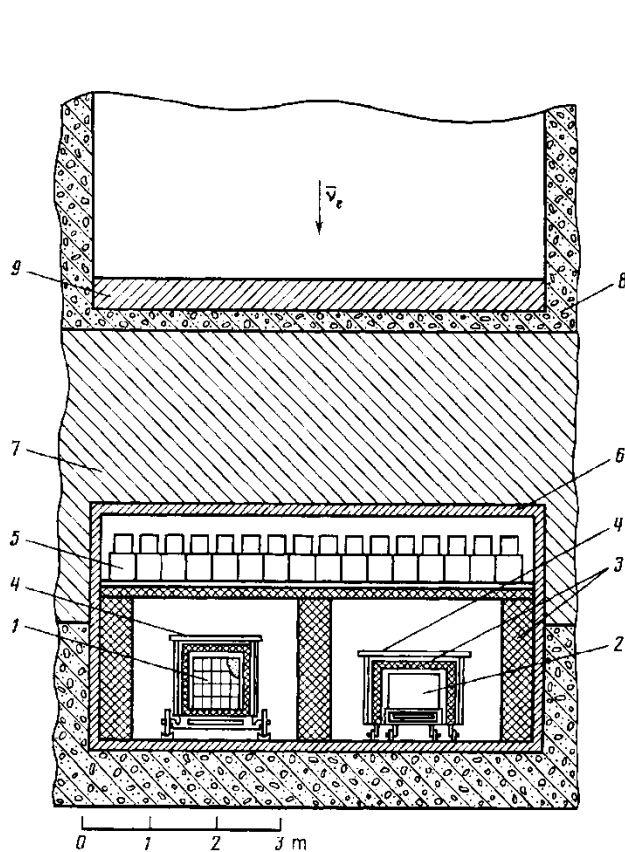
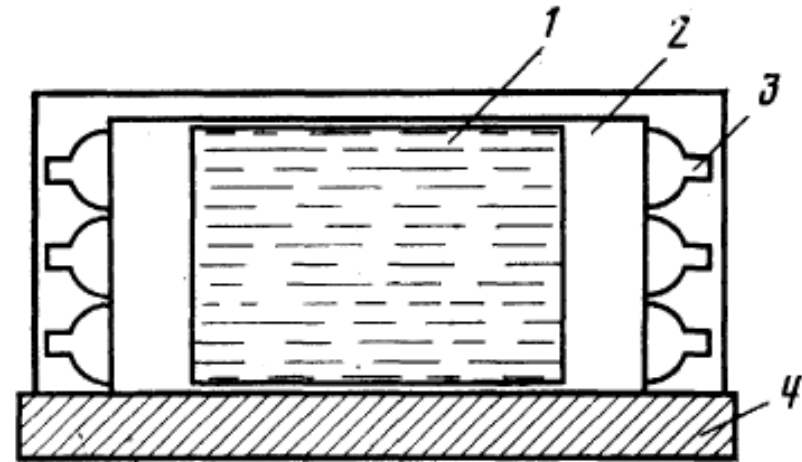
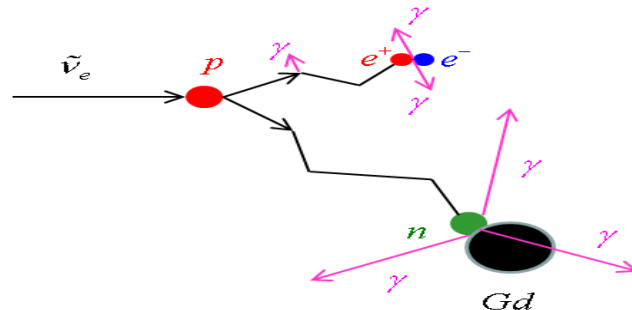
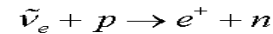


FIG. 1. Schematic diagram of the experimental setup: 1—integrating detector; 2—scintillation-counter spectrometer; 3—polyethylene; 4—scintillators of the anticoincidence shield; 5—tanks containing the liquid scintillator (anticoincidence “hood”); 6—steel; 7—heavy concrete; 8—concrete; 9—additional shielding.



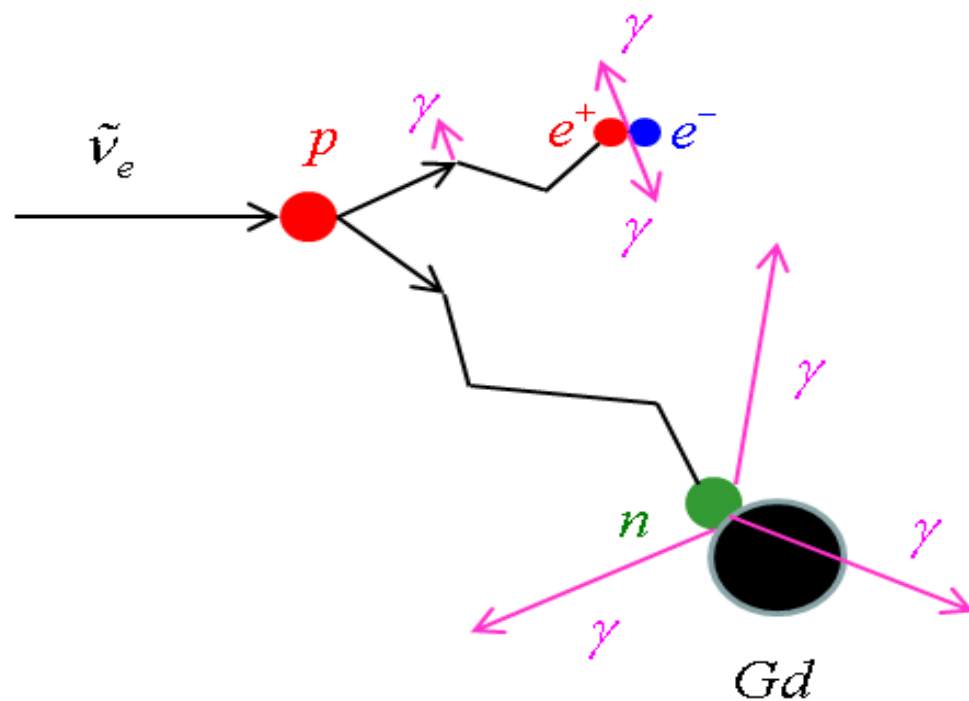
1- liquid scintillator, 2 – lightguide, 3 – FEU-49B,
4 – borated polyethylene.

Регистрация антинейтрино

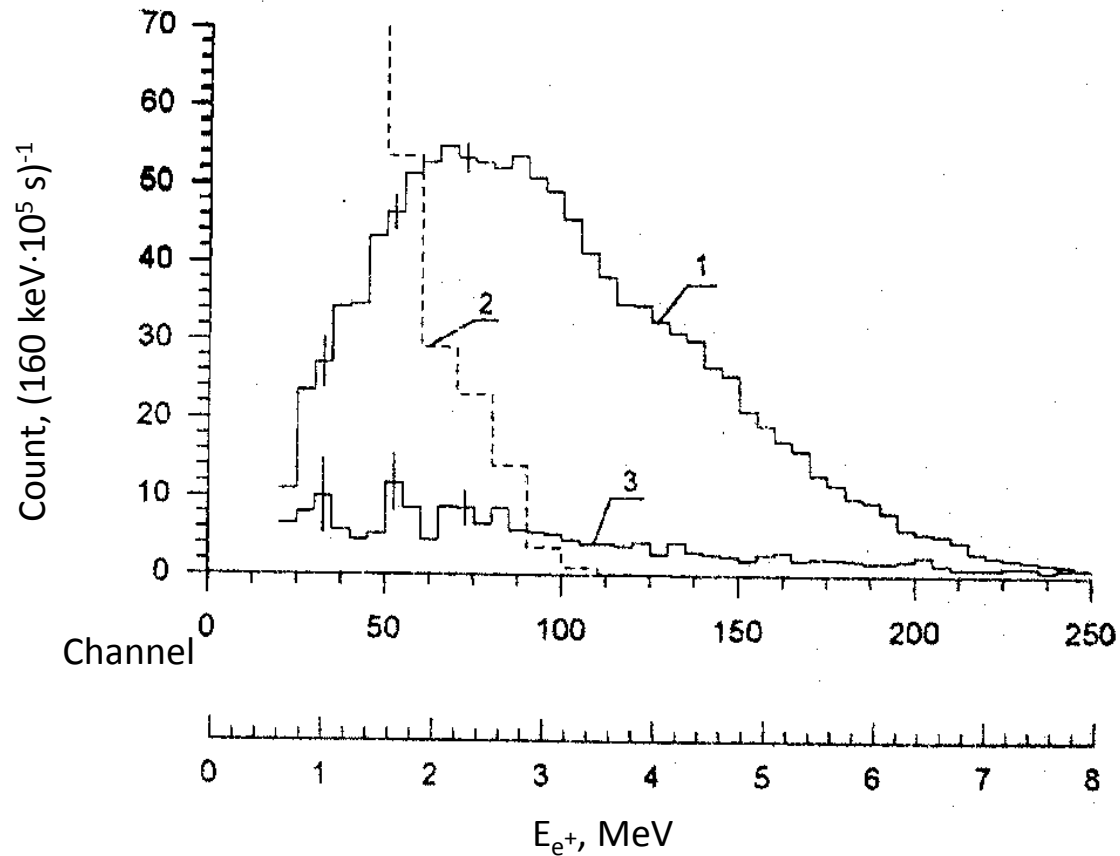


Регистрация антинейтрино

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



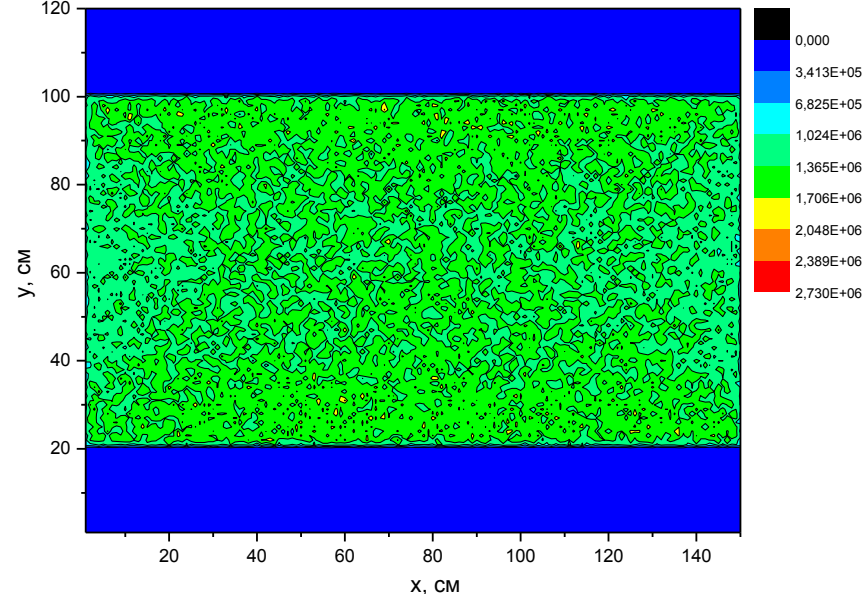
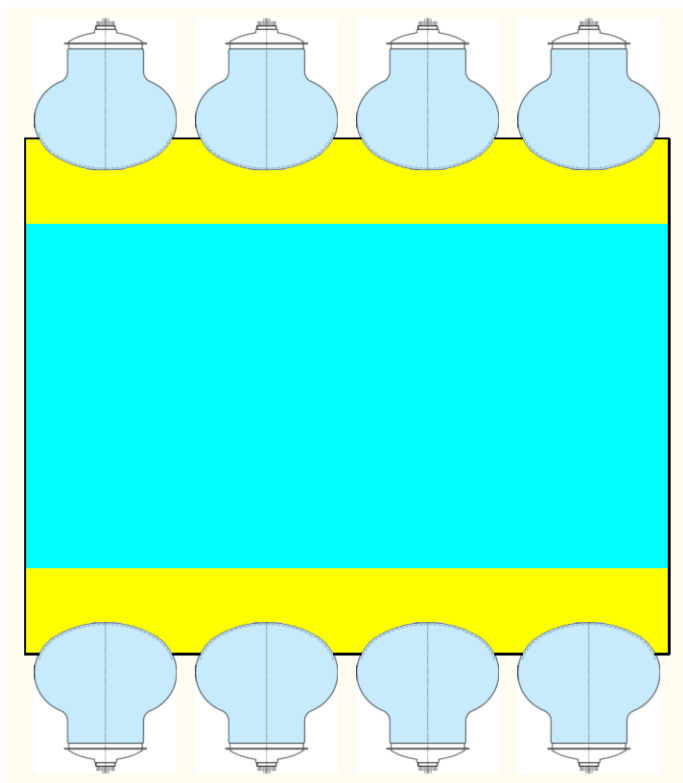
Expected conditions of measurements for single section ~500 l (based on the experiment of L.A.Mikaelyan group at Rovno atomic station)



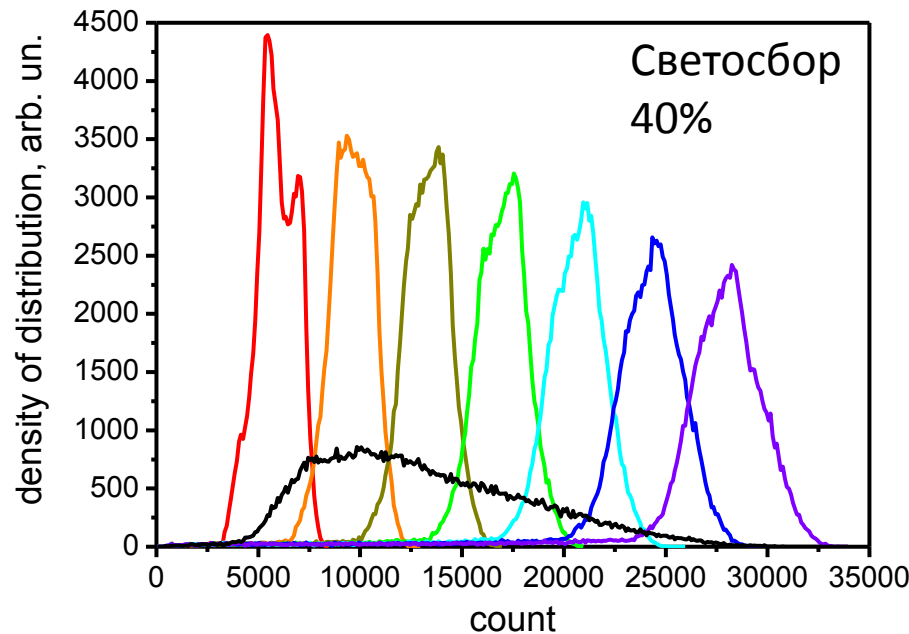
- 1 – neutrino effect + correlated background
- 2 – background of casual events
- 3 – correlated background

*Моделирование детектора и
выбор оптимальной схемы*

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

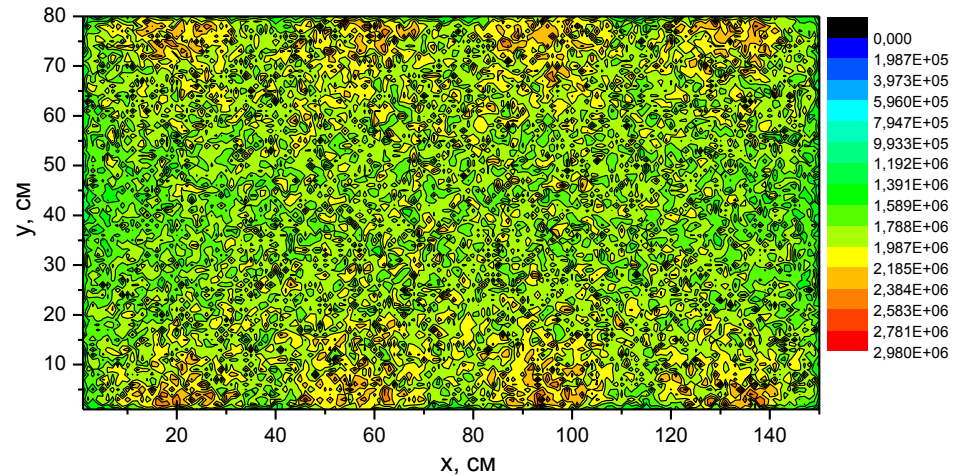
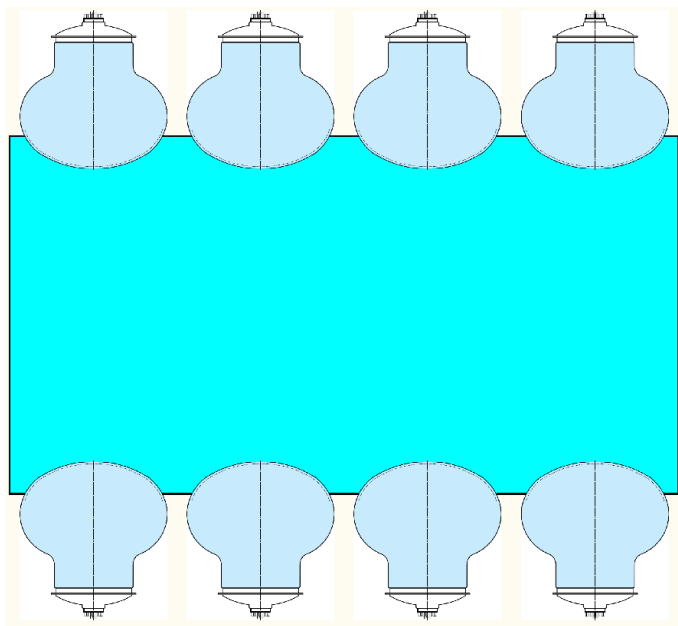


Number of photons reached the PMT depending on the place of positron birth with energy 4 MeV.

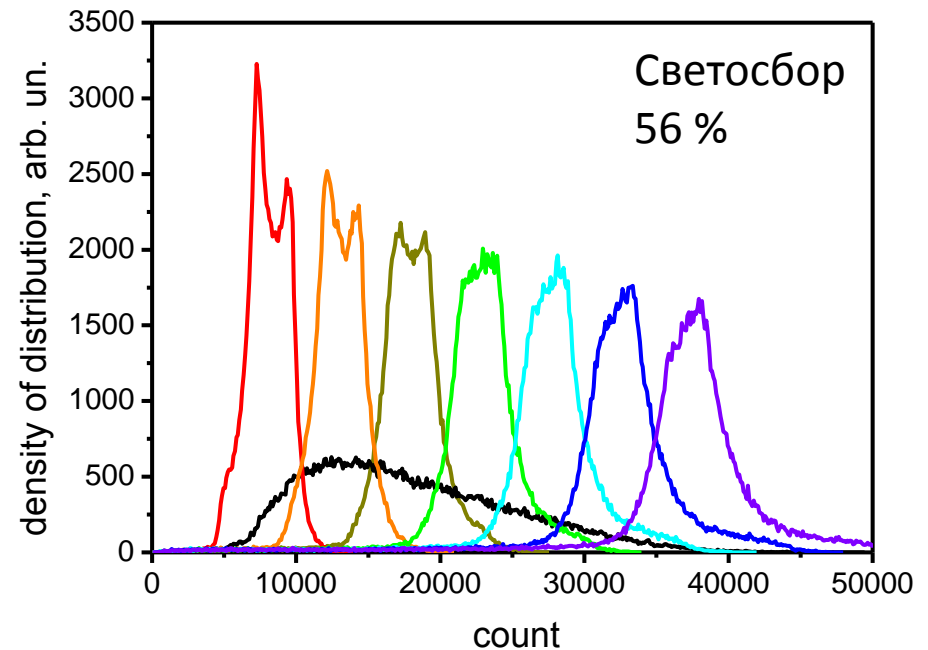


Number of photons reached the PMT. Distributions for positrons with energy from 1 to 7 MeV. Black line is the distribution for positron spectrum.

Scheme with 8 PMT R8055 Hamamatsu

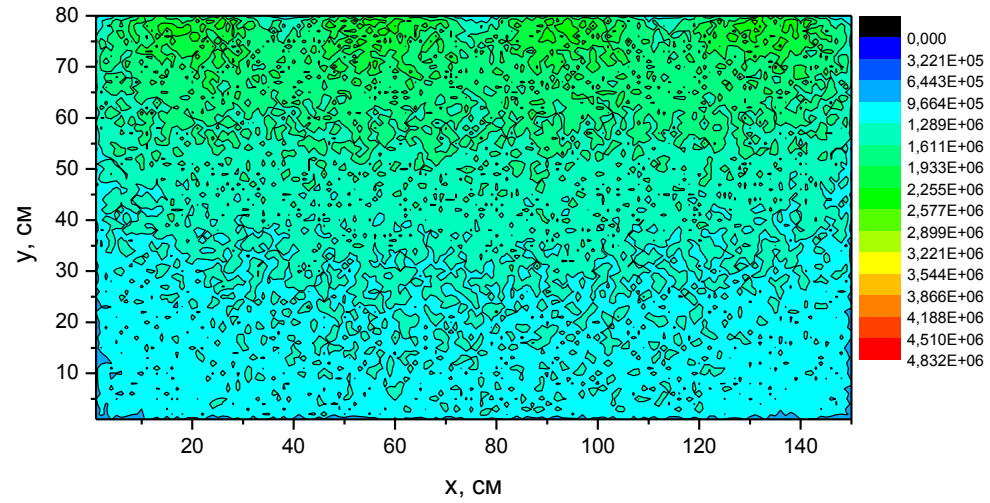
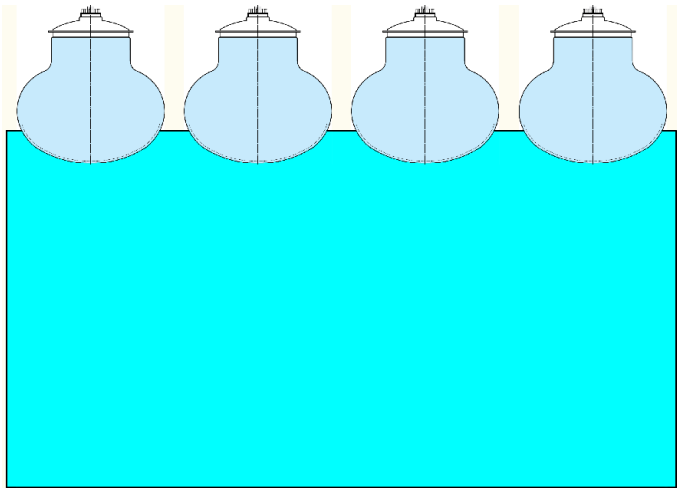


Number of photons counted by PMT depending on the place of positron birth with energy 4 MeV.

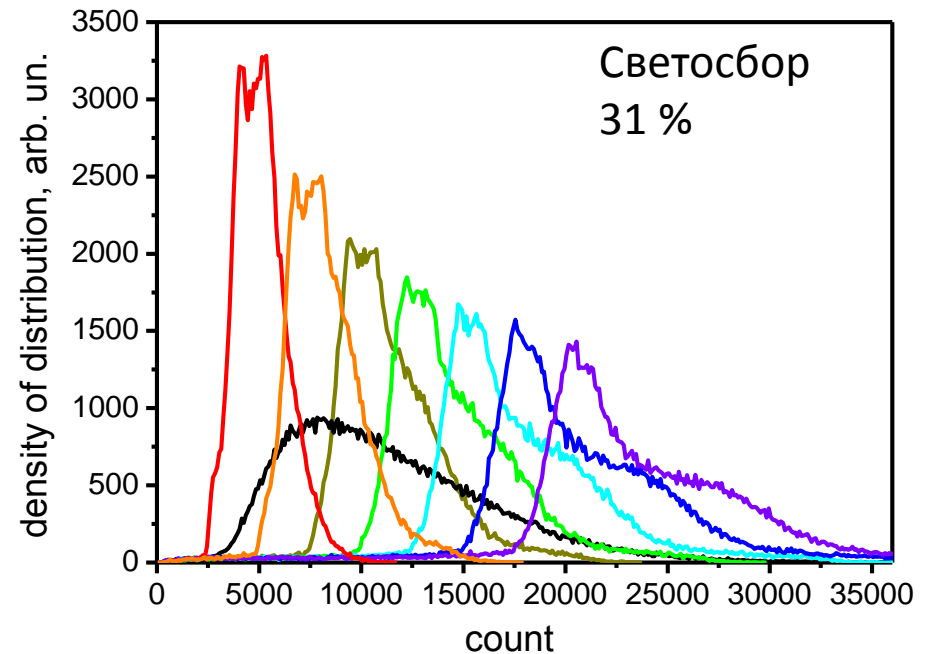


Number of photons counted by PMT distributions from positrons with energy from 1 to 7 MeV. Black line is the distribution for positron spectrum.

Scheme with 4 PMT R8055 Hamamatsu

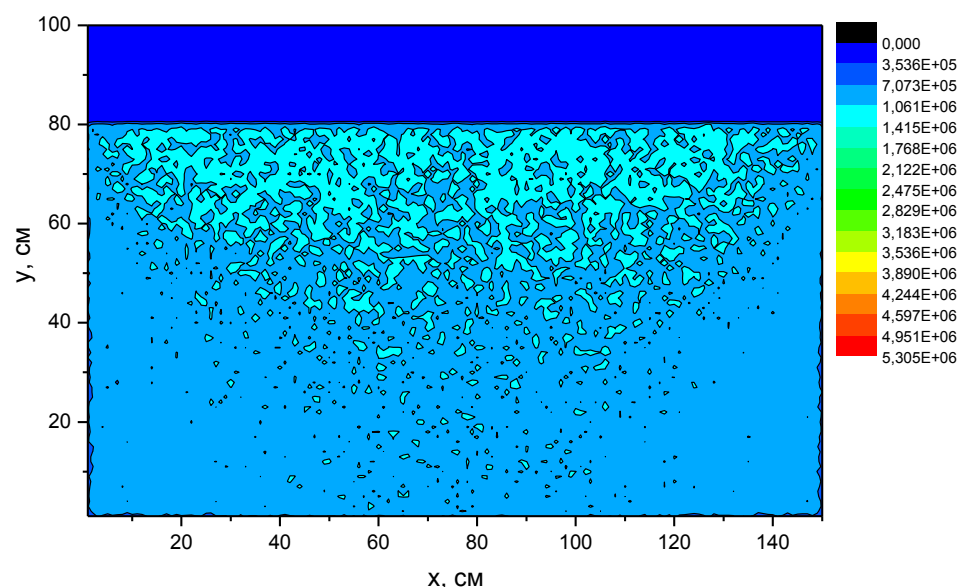
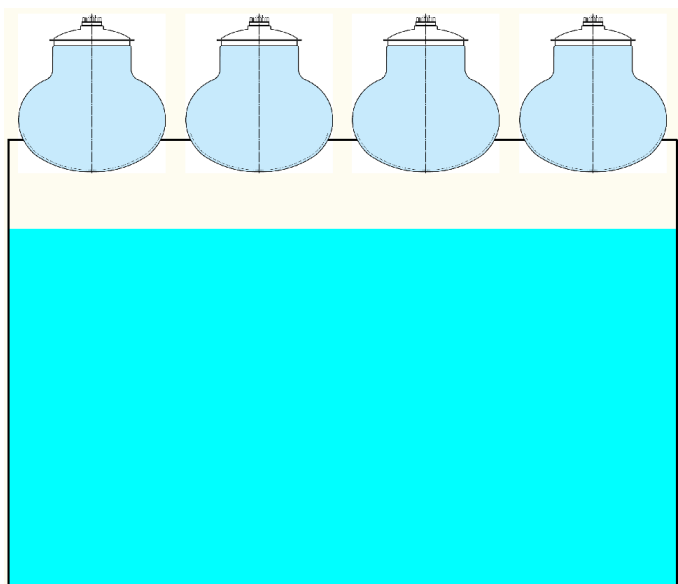


Number of photons counted by PMT depending on the place of positron birth with energy 4 MeV.

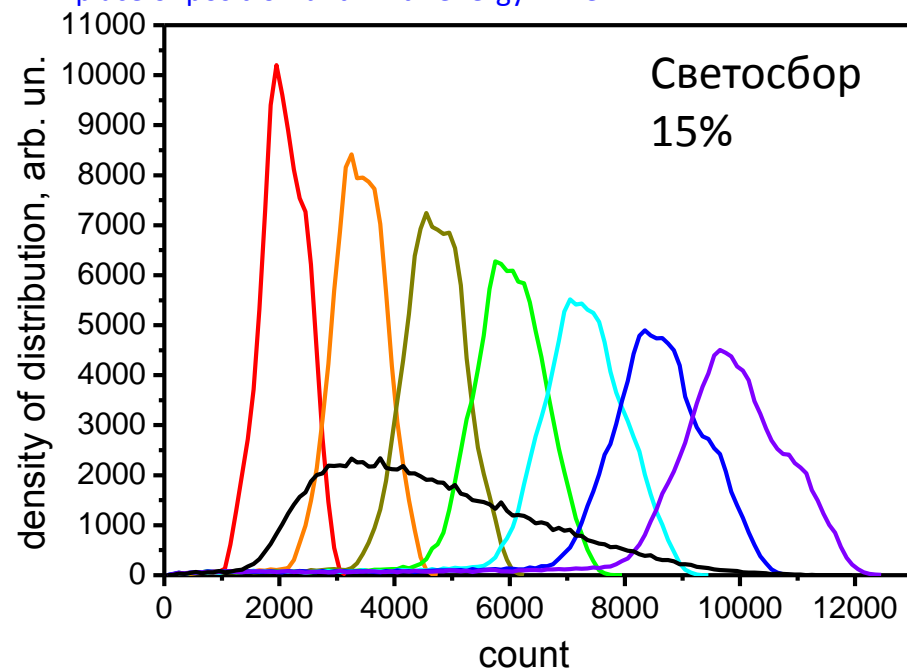


Number of photons counted by PMT distributions from positrons with energy from 1 to 7 MeV. Black line is the distribution for positron spectrum.

Scheme with 4 PMT R8055 Hamamatsu (with air)



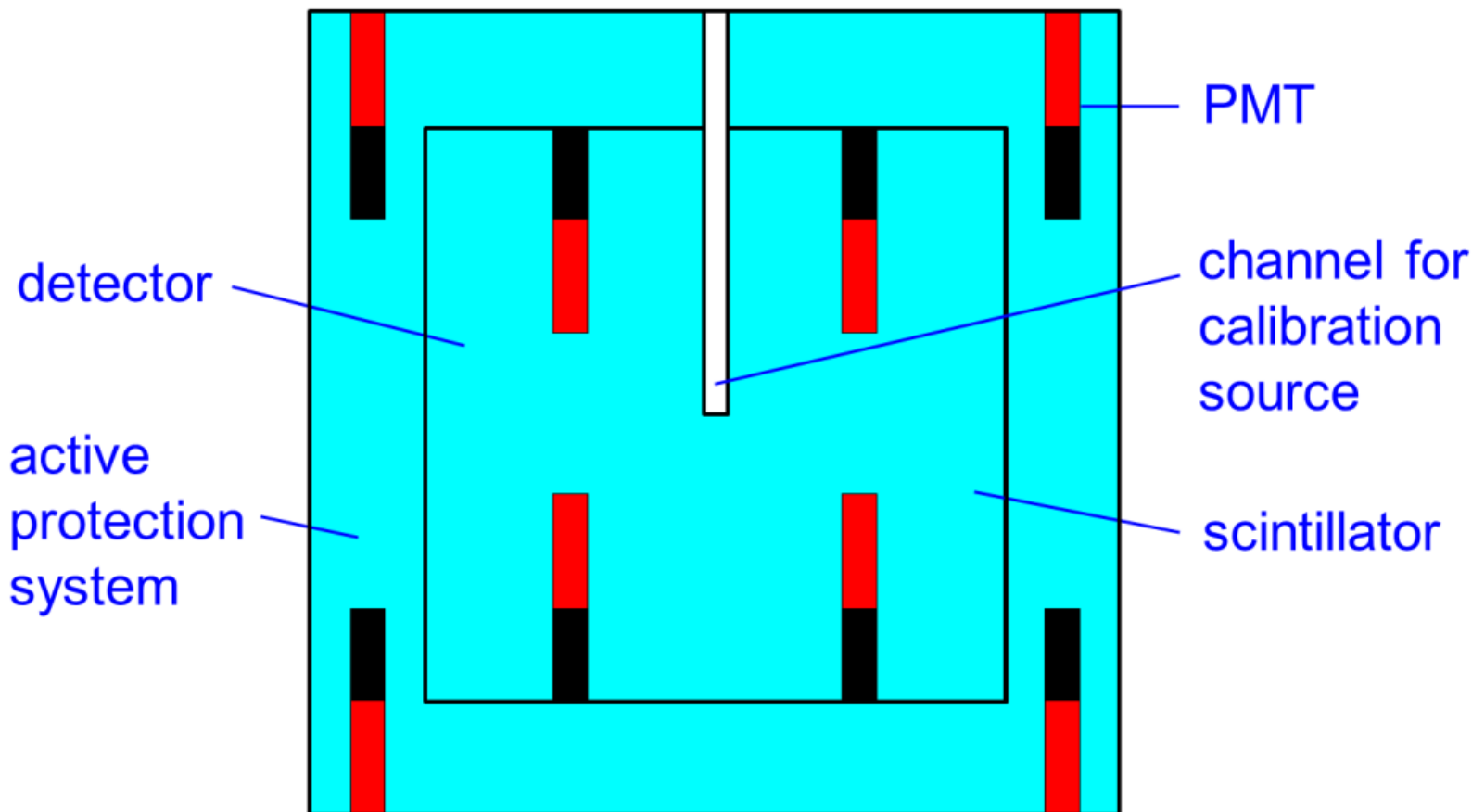
Number of photons counted by PMT depending on the place of positron birth with energy 4 MeV.



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

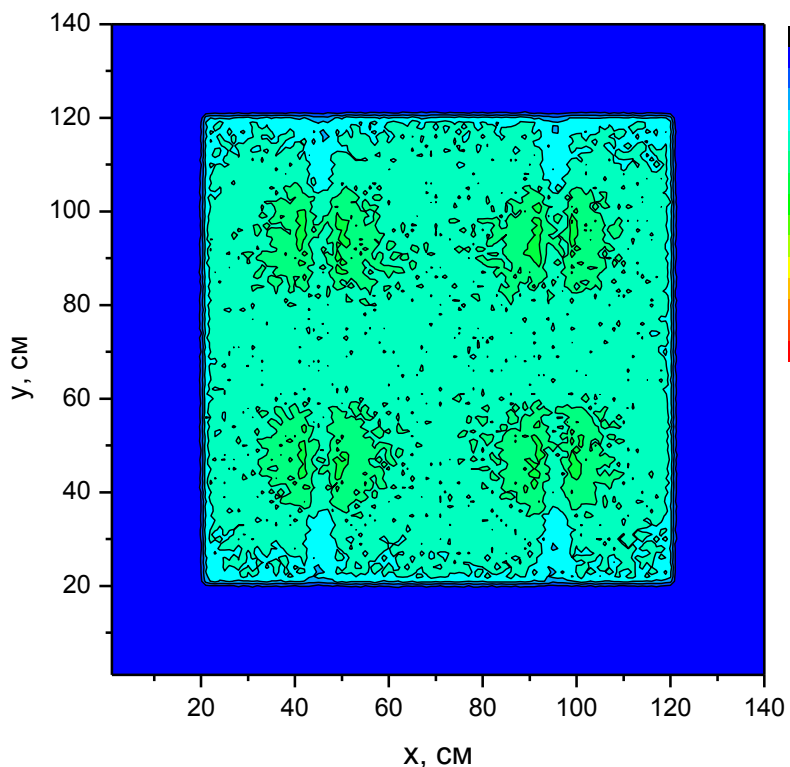
Scheme with vertical PMT

Светосбор 27 %

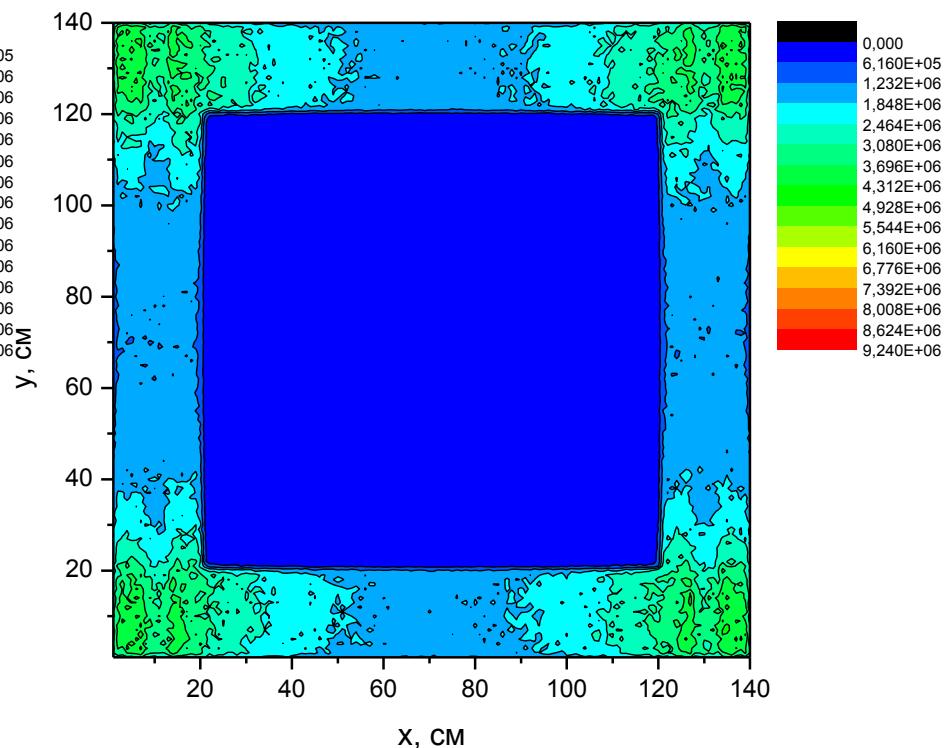


Scheme with vertical PMT

inside

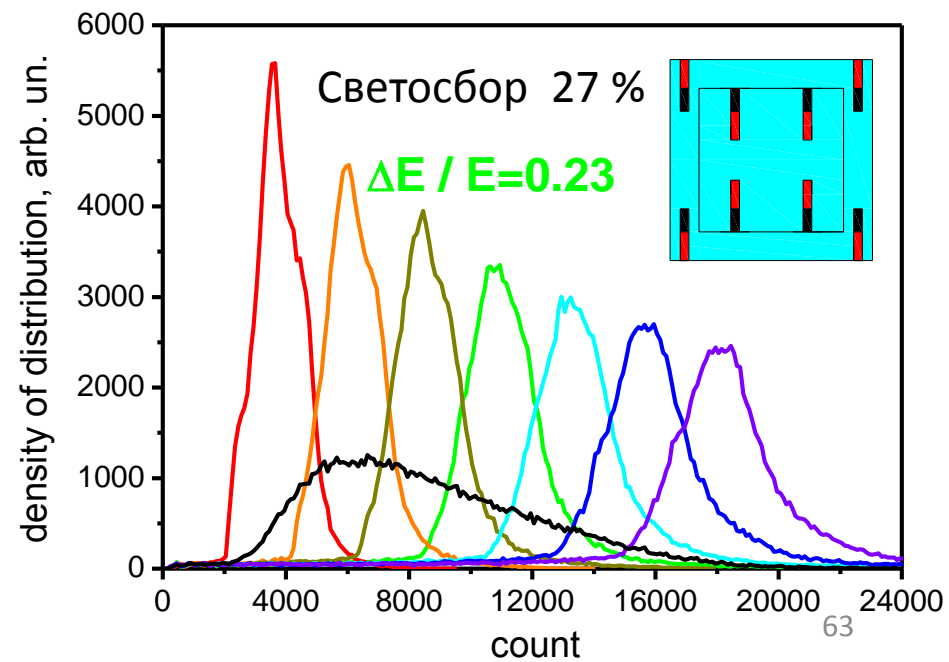
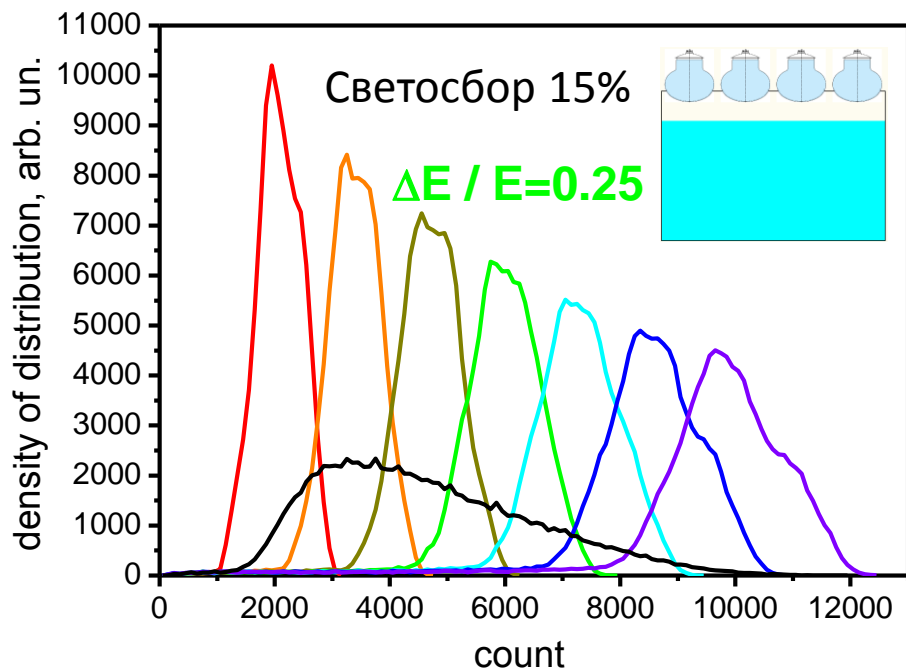
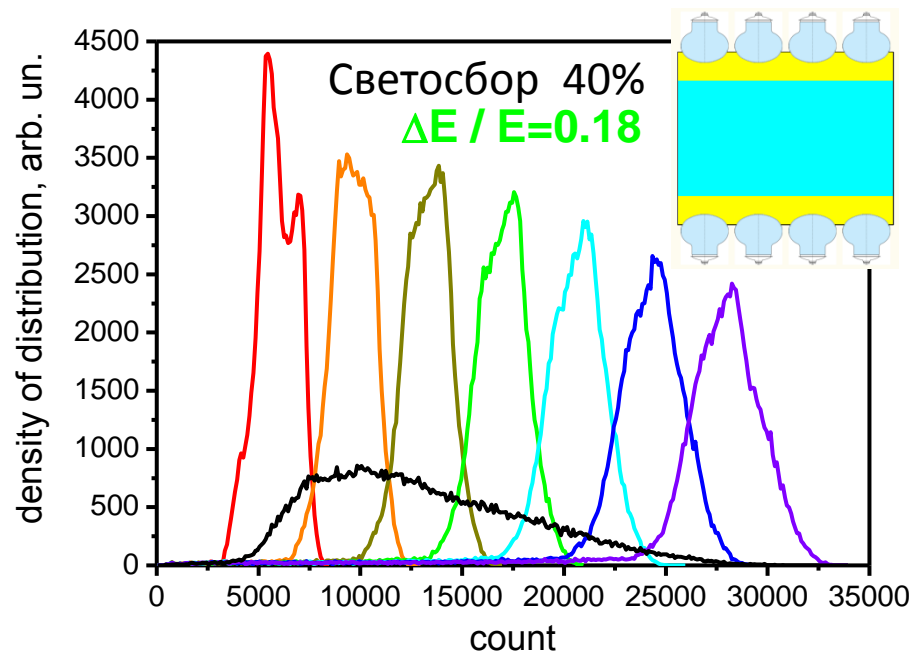


exterior

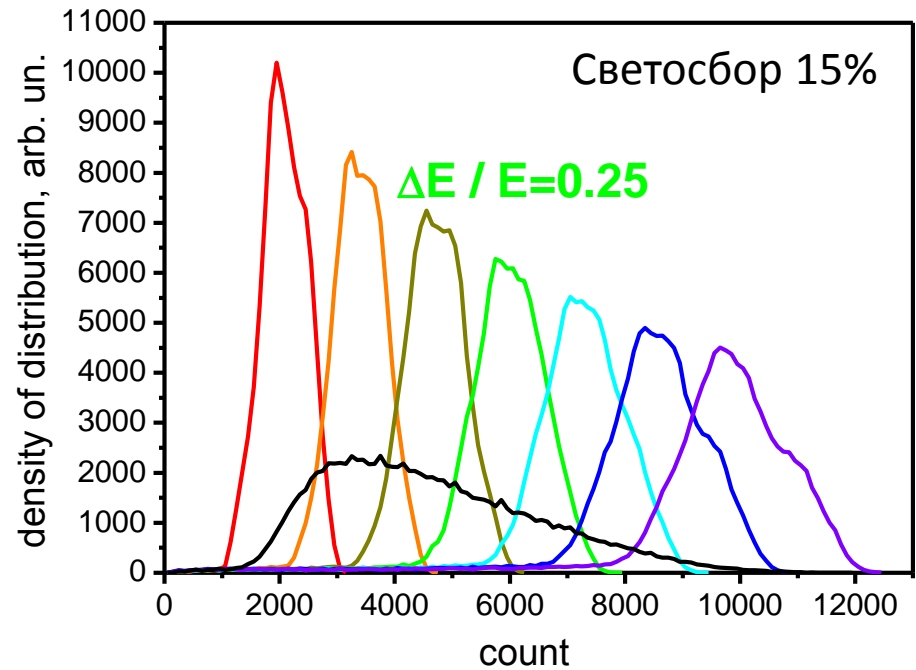
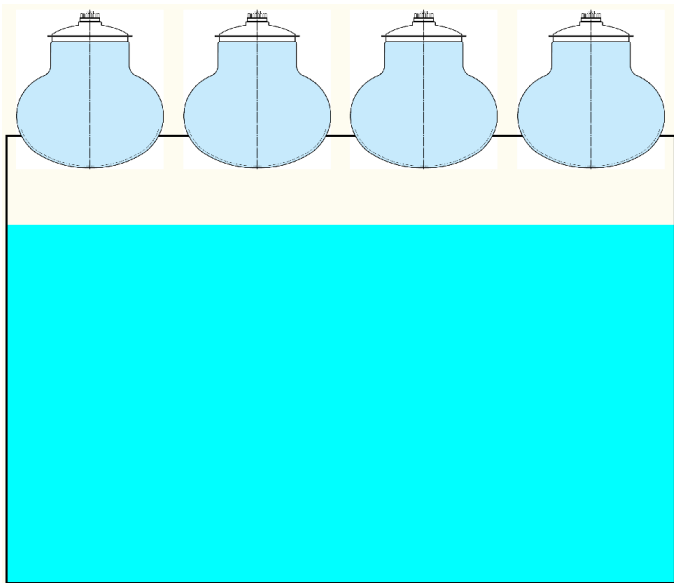


Number of photons reached the PMTs depending on the place of positron with energy 4 MeV was birth

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



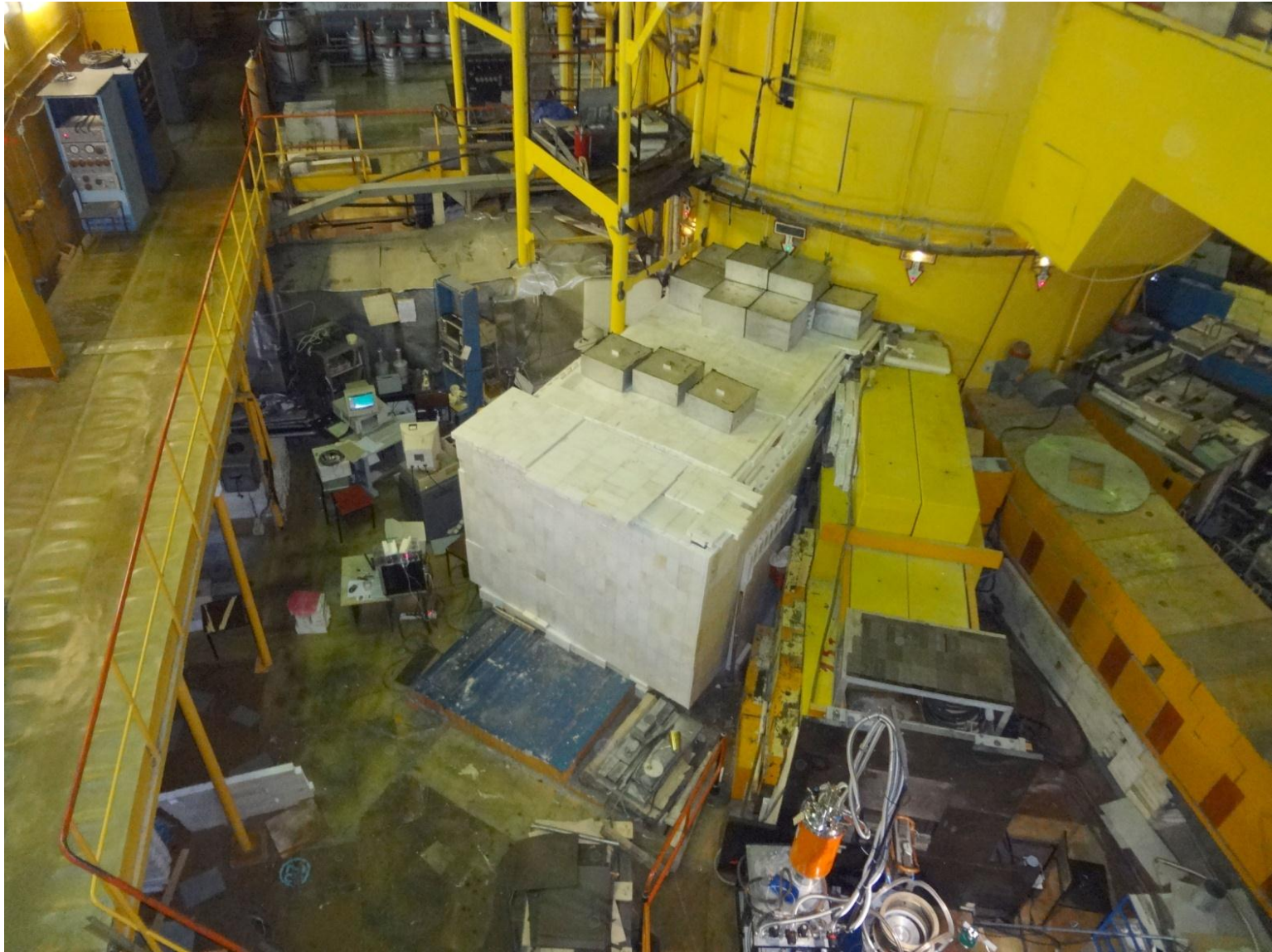
Монтаж отражателя



Система перемещения детектора



Concrete shielding + Lead shielding + (CH₂ + B)



Внешняя антисовпаденческая защита «зонтик» (32 пластины 0.5x0.5x0.12 м³)



*Внешняя активная защита из пластика
с размерами 0.5 x 0.5 x 0.115 м³
и ФЭУ-49Б*

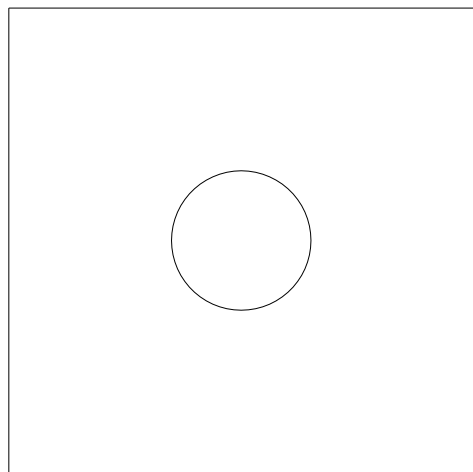
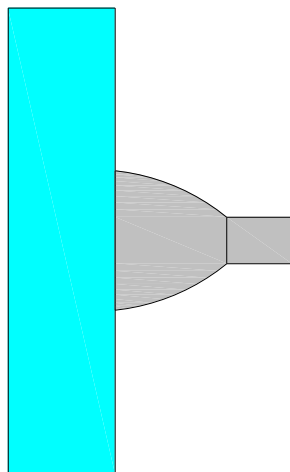
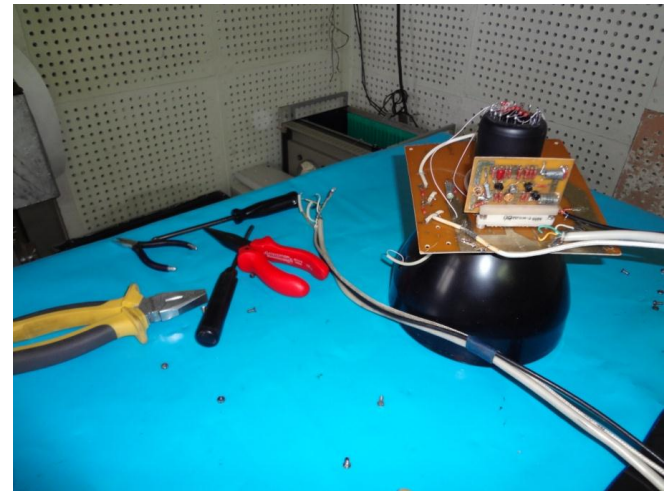


Схема активной защиты

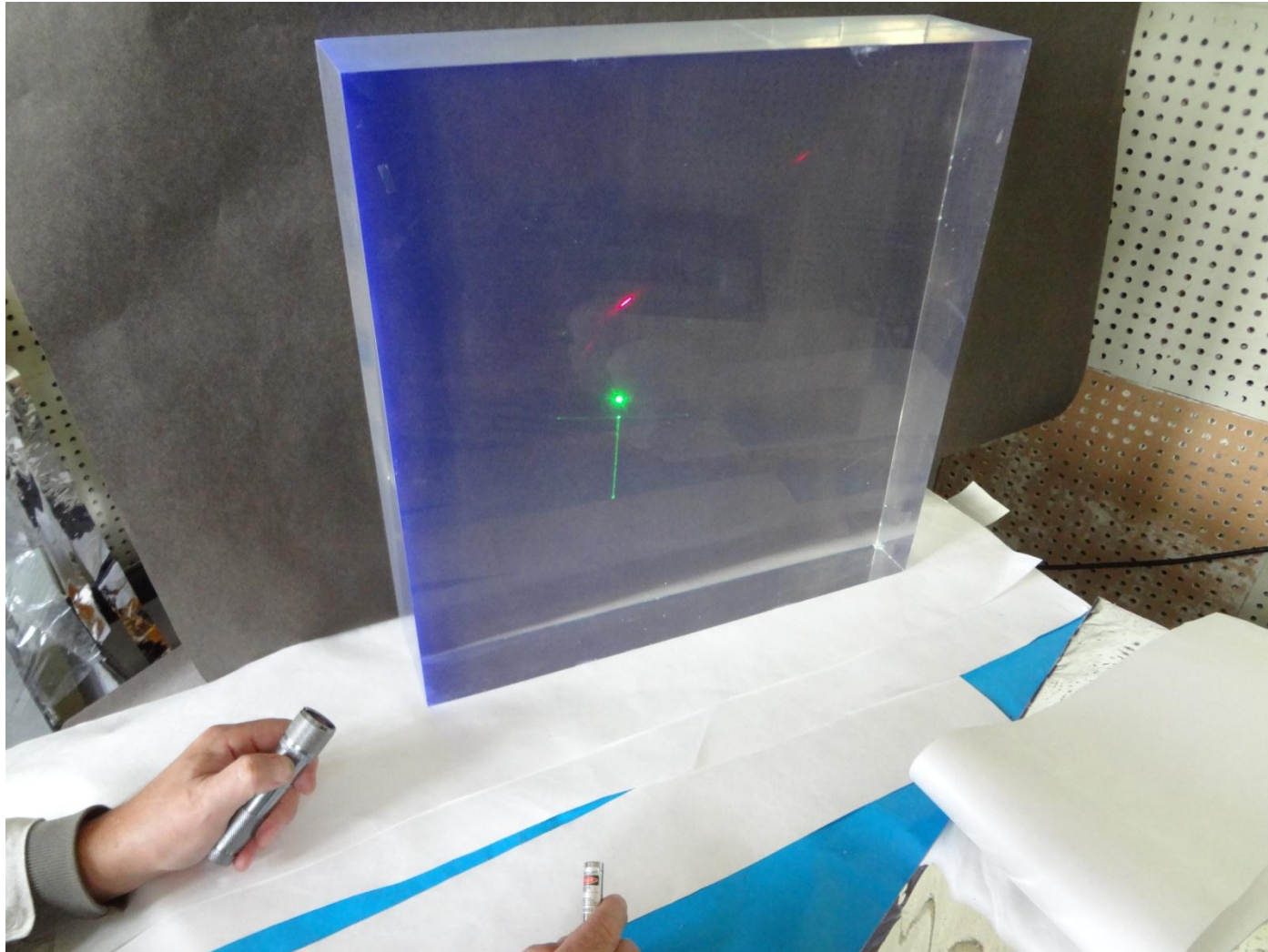


ФЭУ-49Б

ФЭУ-49 с пластиковым сцинтиллятором 0.5x0.5x0.12 м³



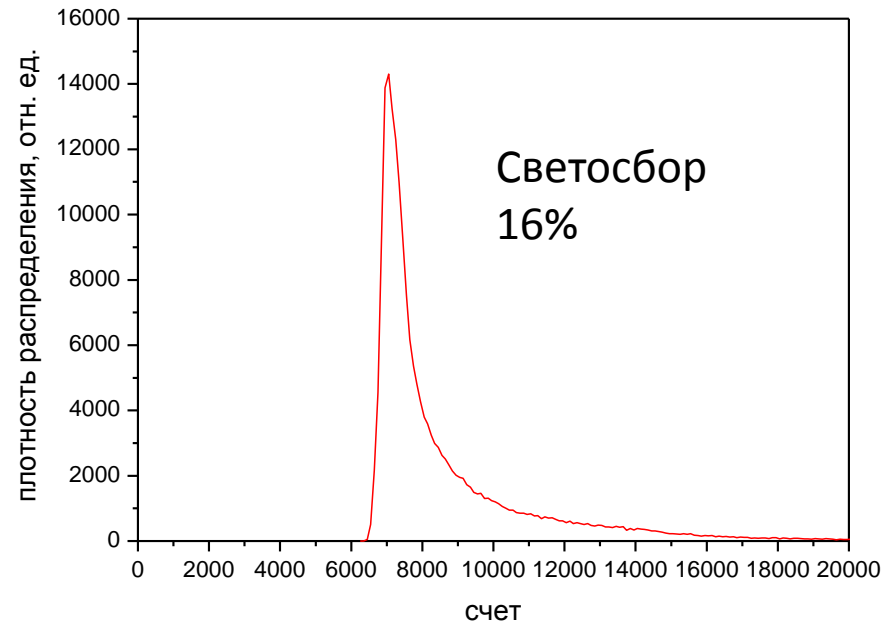
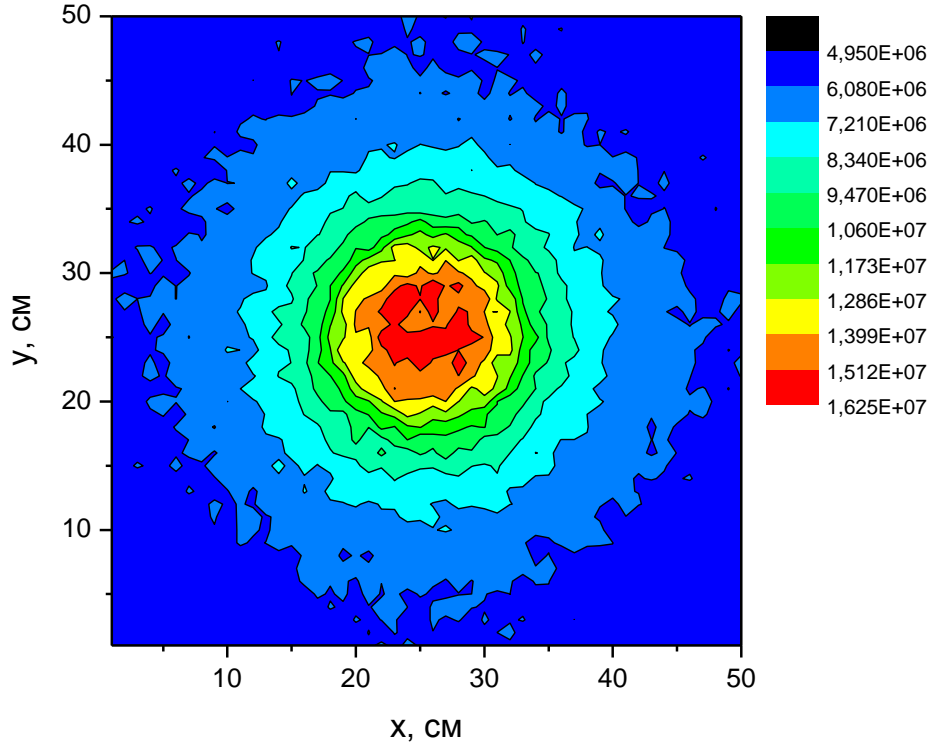
сцинтилятор 0.5x0.5x0.12 м³



Монтаж отражателя



Моделирование светосбора



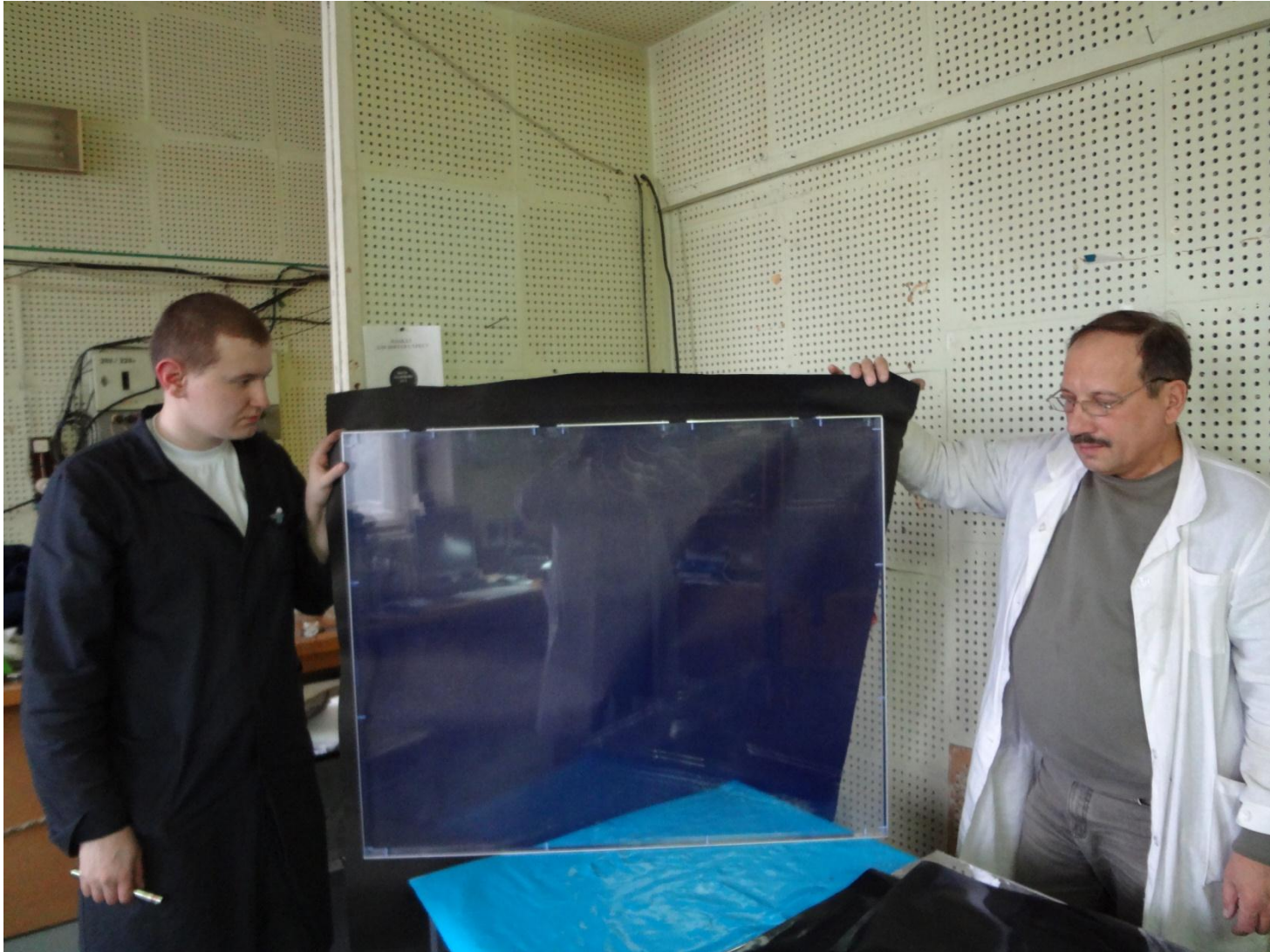
. Счет ФЭУ в зависимости от места точечного события с энергией 5 МэВ.

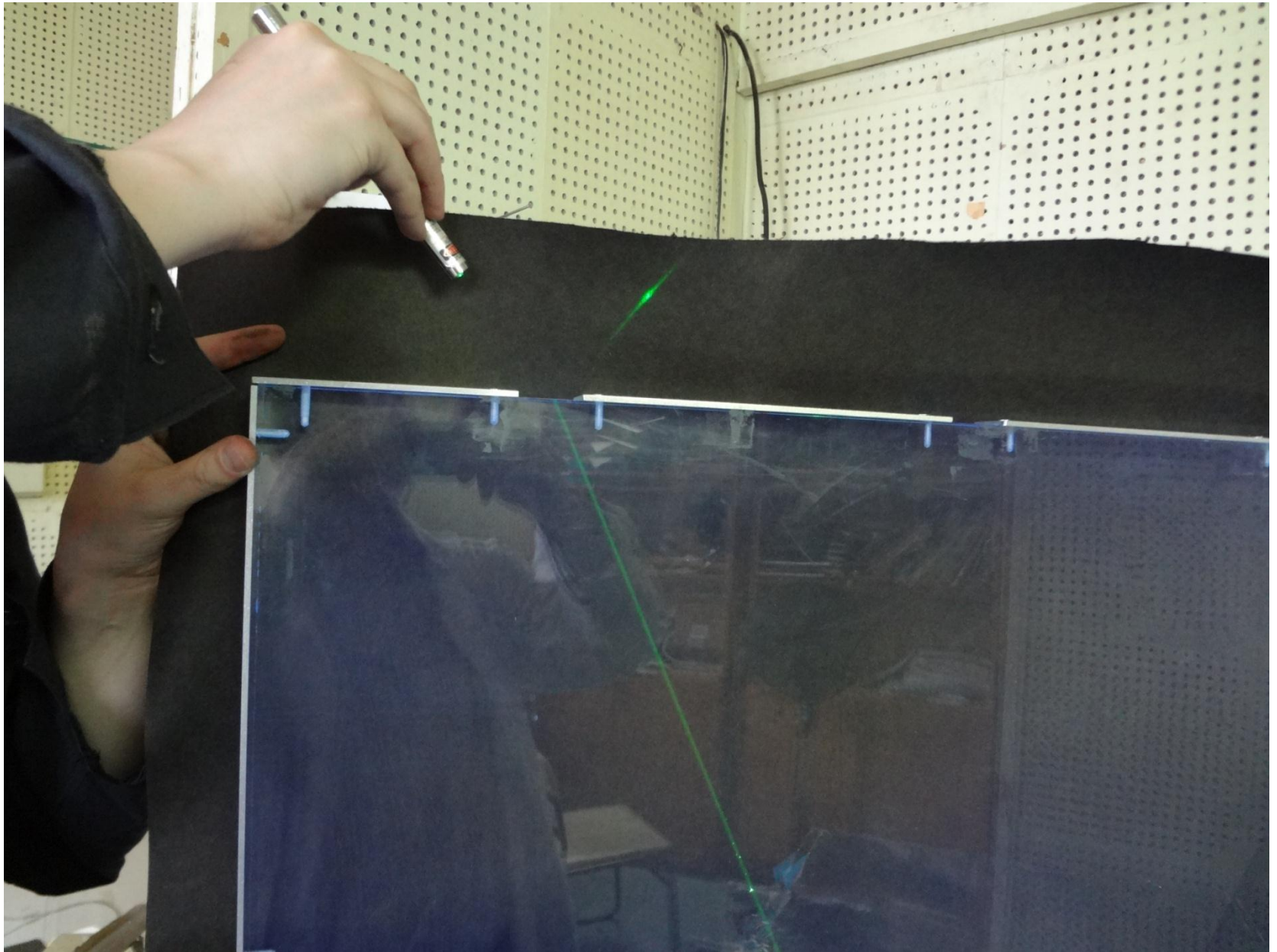
Распределение счета ФЭУ.

*Внутренняя антисовпаденческая защита из
пластин сцинтилятора $1 \times 1 \times 0.025 \text{ м}^3$*



*Внутренняя антисовпаденческая защита
из пластин сцинтилятора 1x1x0.025 м³*

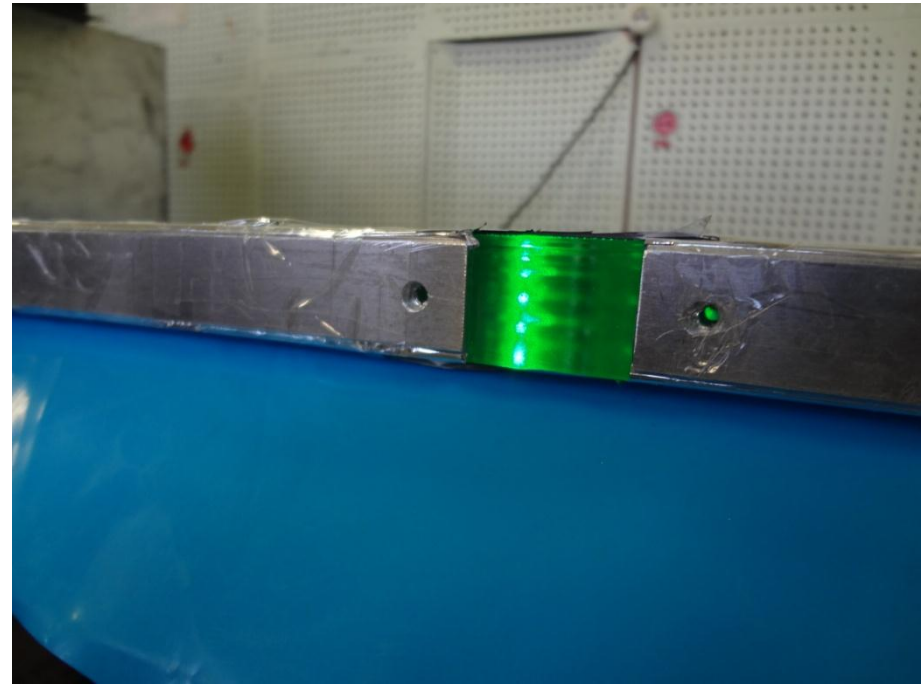
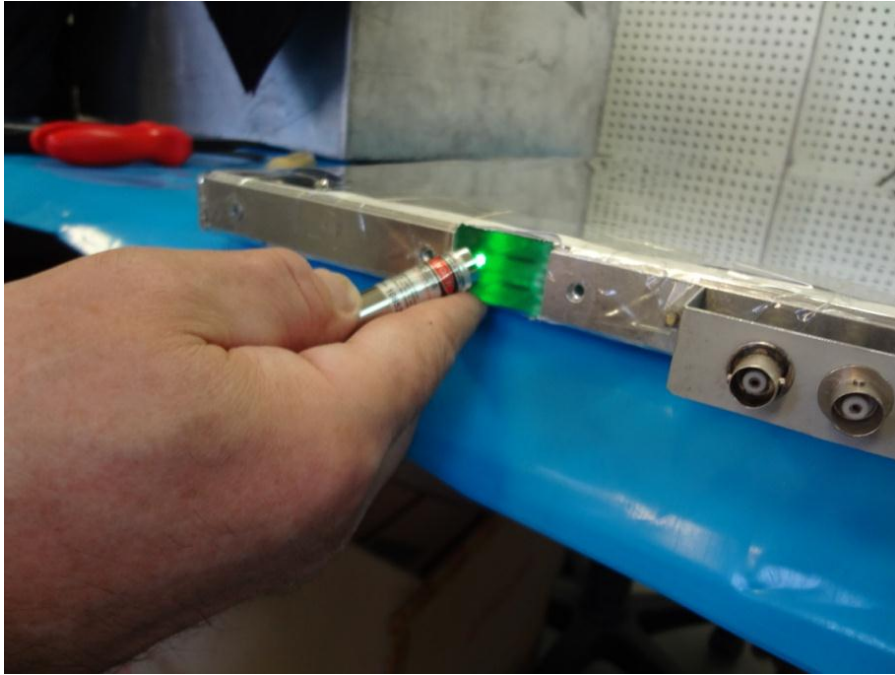




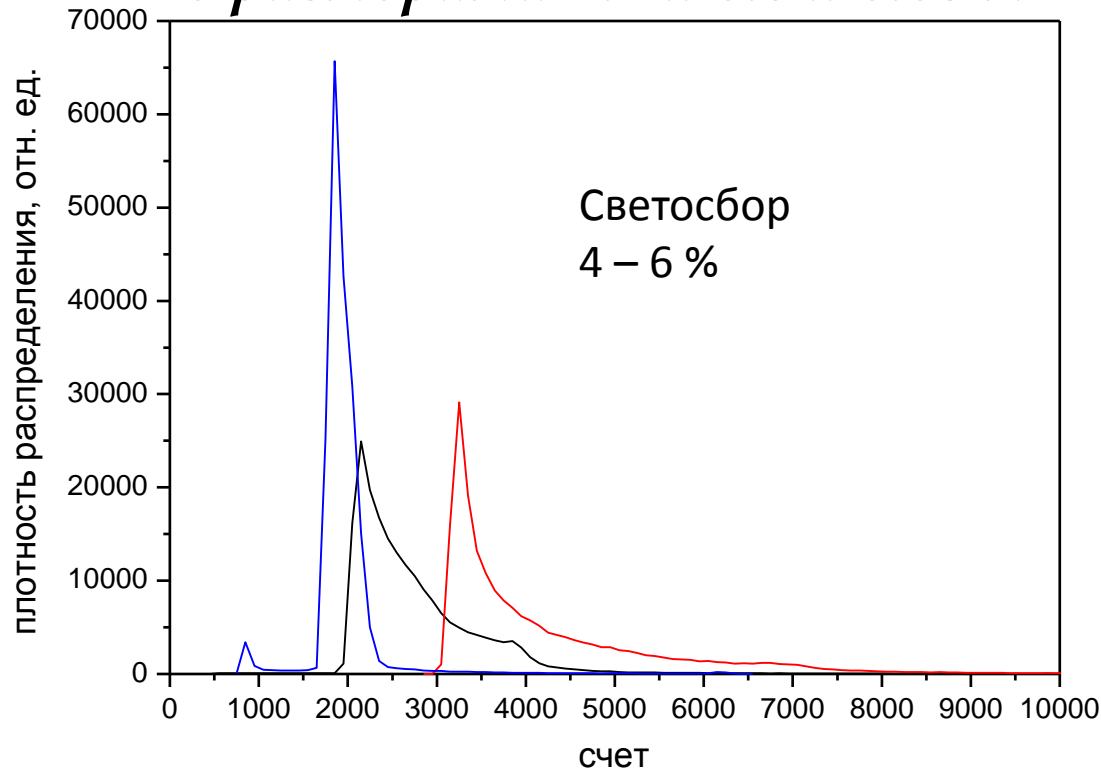
Внутренняя антисовпаденческая защита (монтаж с отражателями и с ФЭУ 85)



Эффект полного внутреннего отражения



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



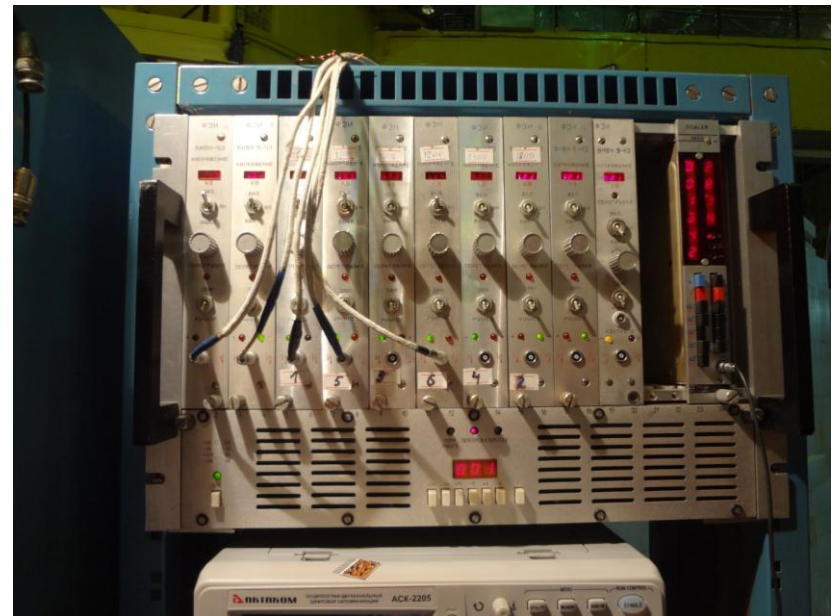
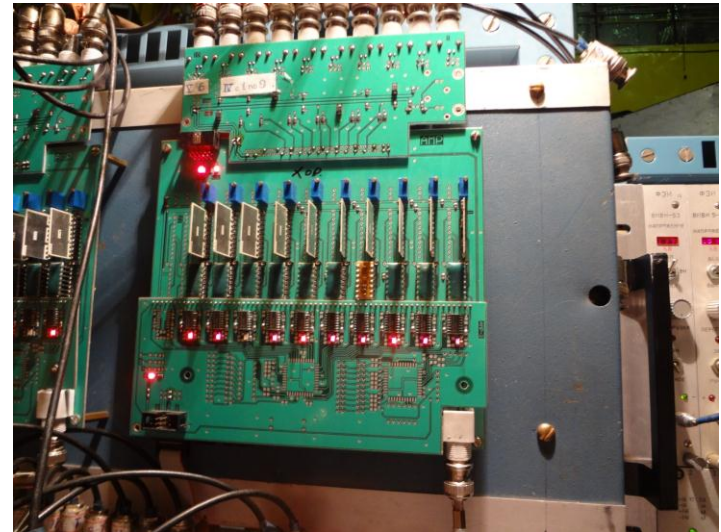
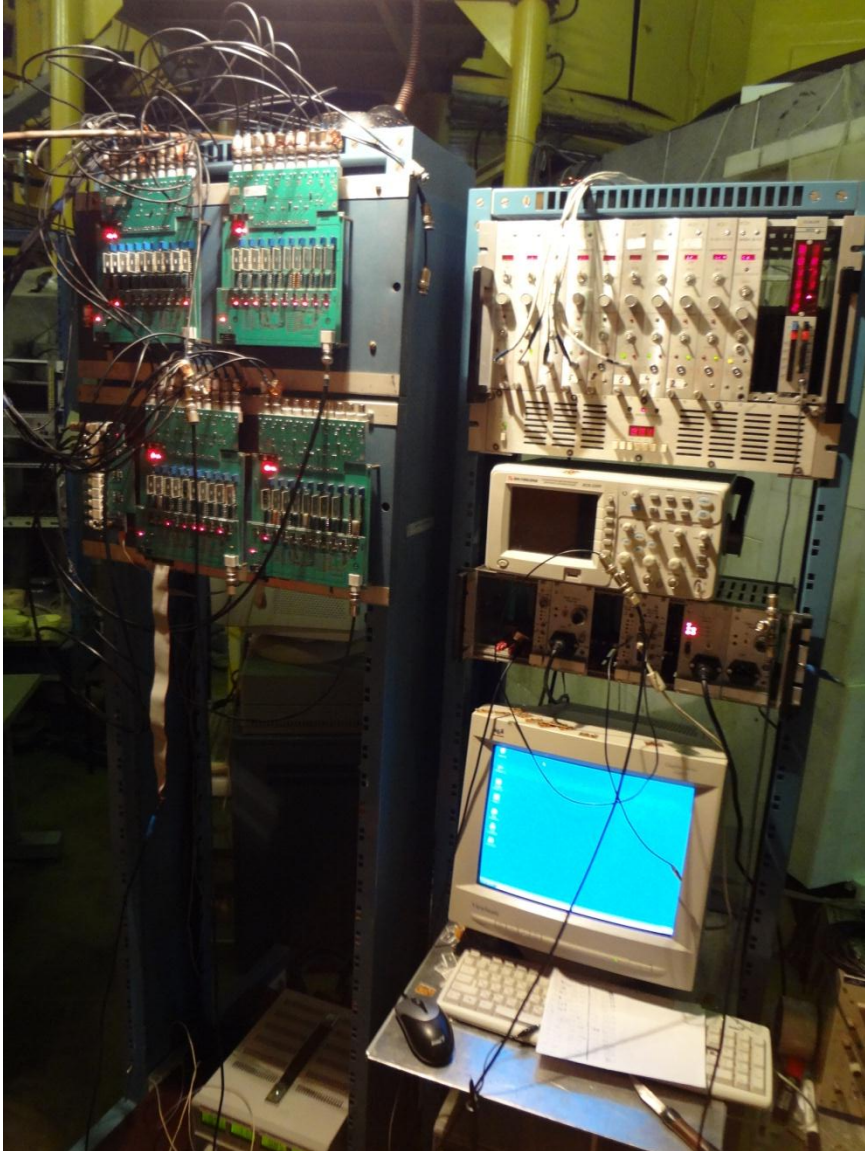
. Распределение суммарного счета ФЭУ:

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

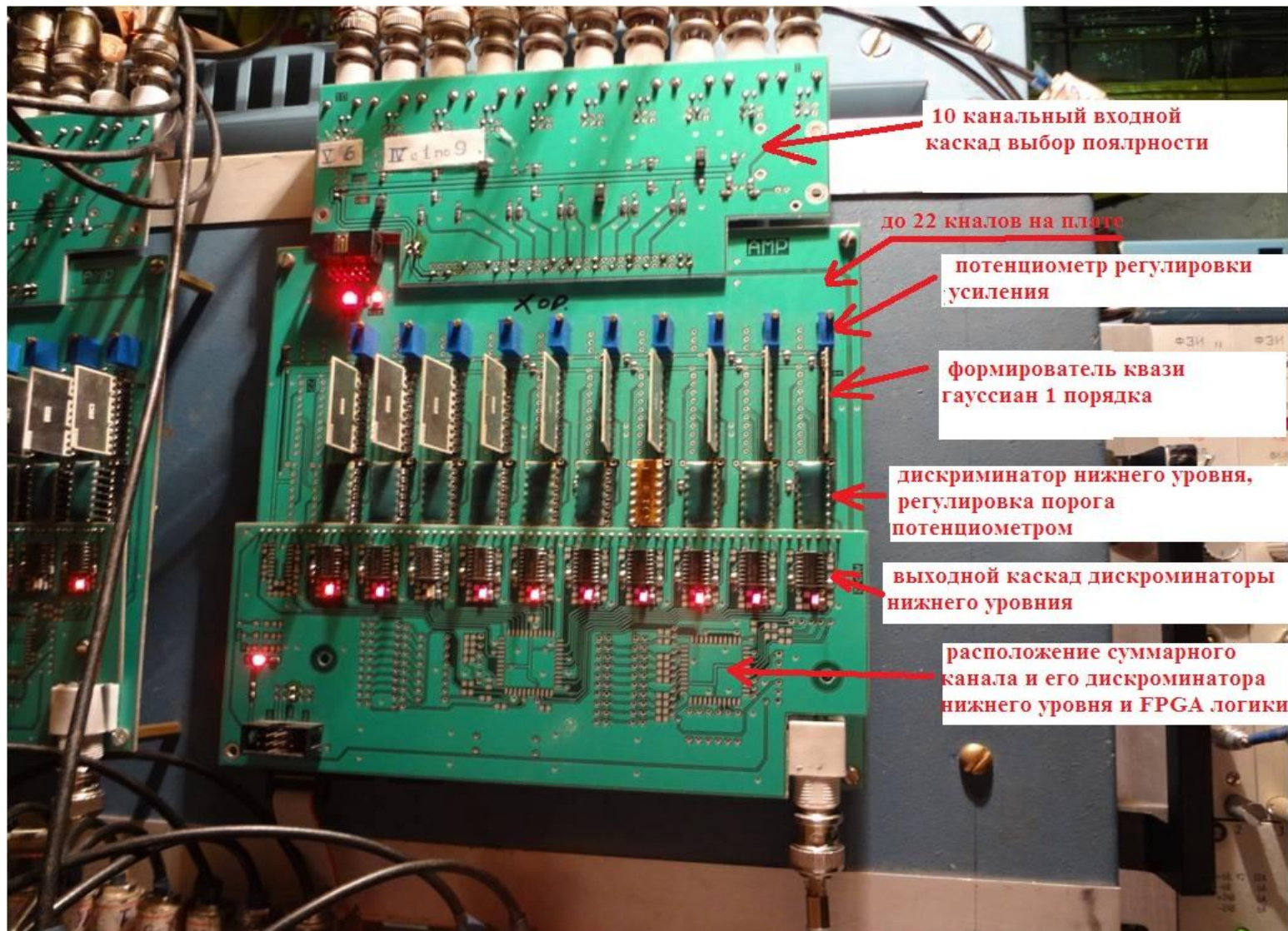
— оптический контакт сцнтиллятора с ФЭУ, сцнтиллятор обернут черной бумагой;

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

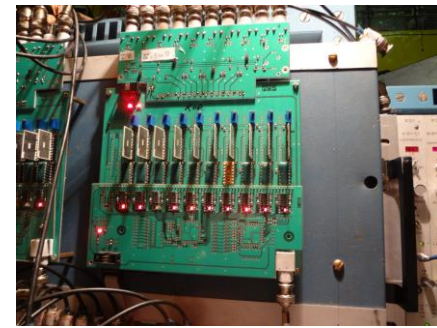
Электроника



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.

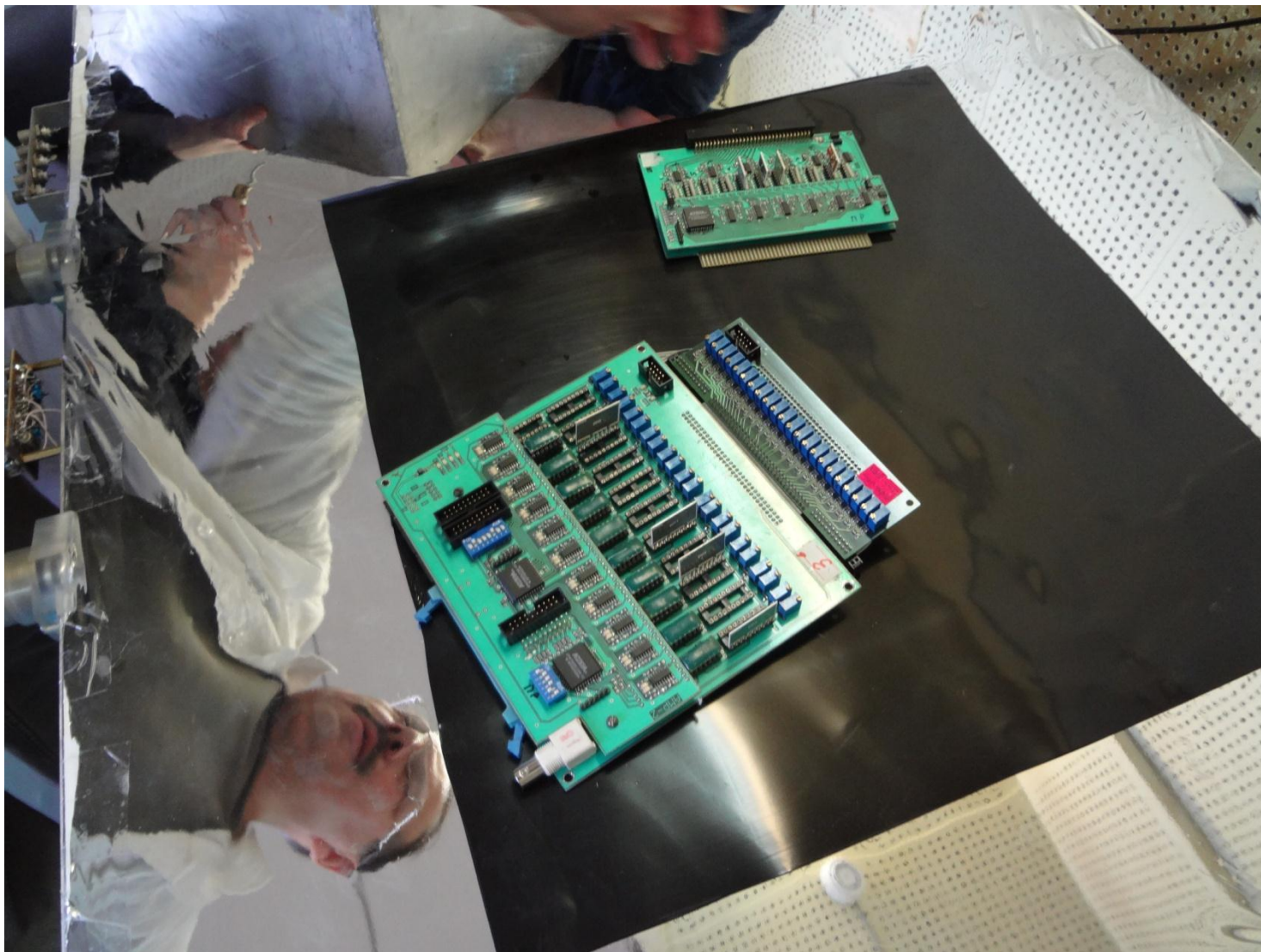
Такие платы могут объединяться в систему с измерением амплитуды, времени и координаты детектора.

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



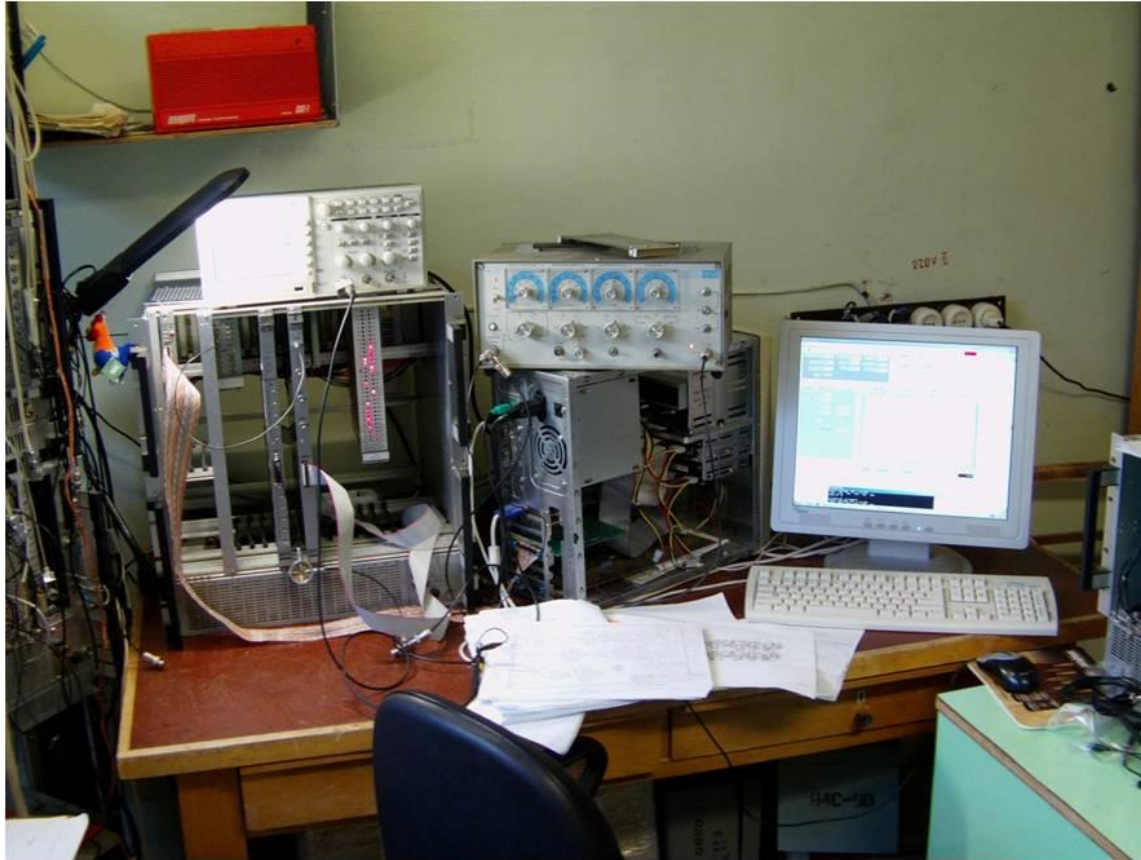
Электроника



Электроника



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

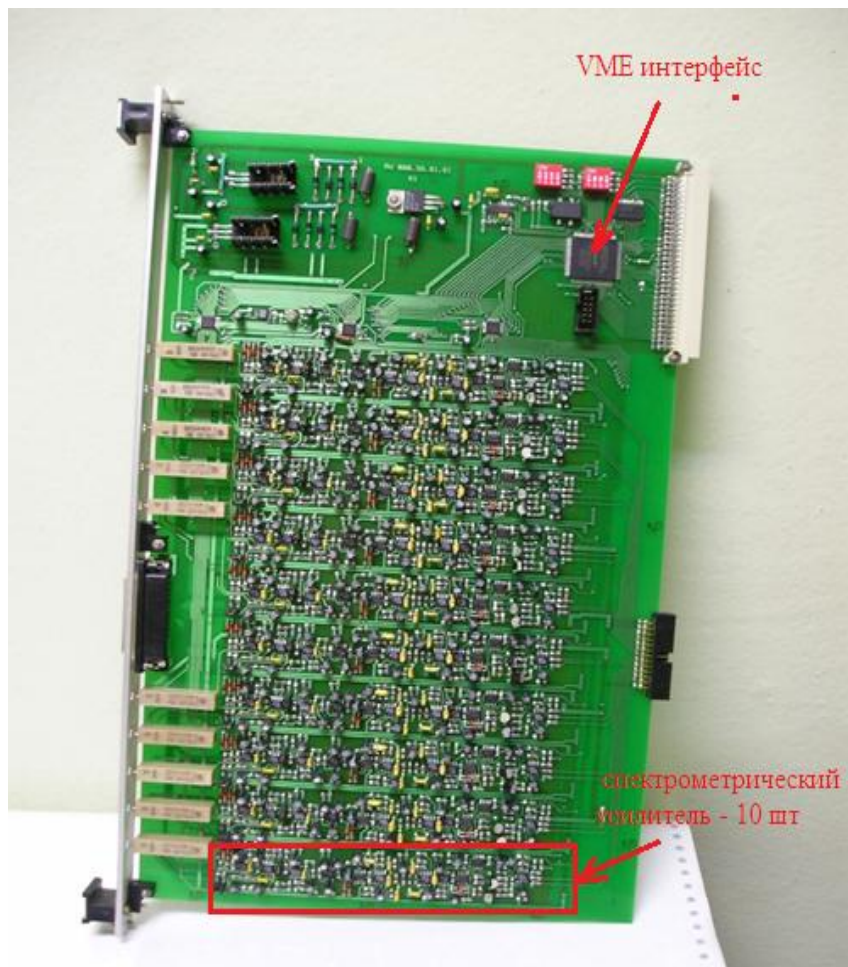


Состоит из двух типов модулей (всего 12+12)

Модернизированная система при регистрации по методу “КИНО”:

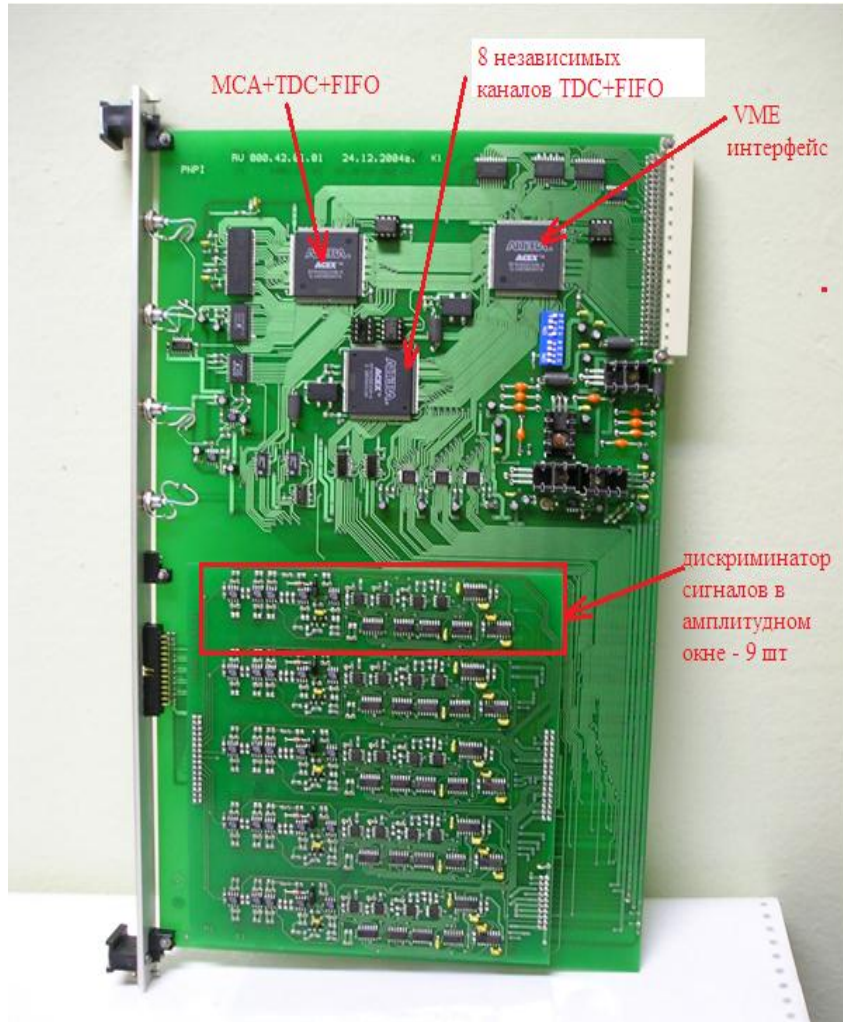
- промышленный компьютер модели iROBO-2000-40Q5TRHN
- высокоскоростной интерфейс PCI-VME фирмы NI модели VME-PCI8000 для считывания данных из VME 9U крейта в котором расположены 12 модулей обработки сигналов RV000.42. Всего 12 каналов регистрации амплитуда+время и 96 каналов регистрации – амплитудные 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

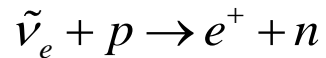
Процесс осцилляций описывается уравнением

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

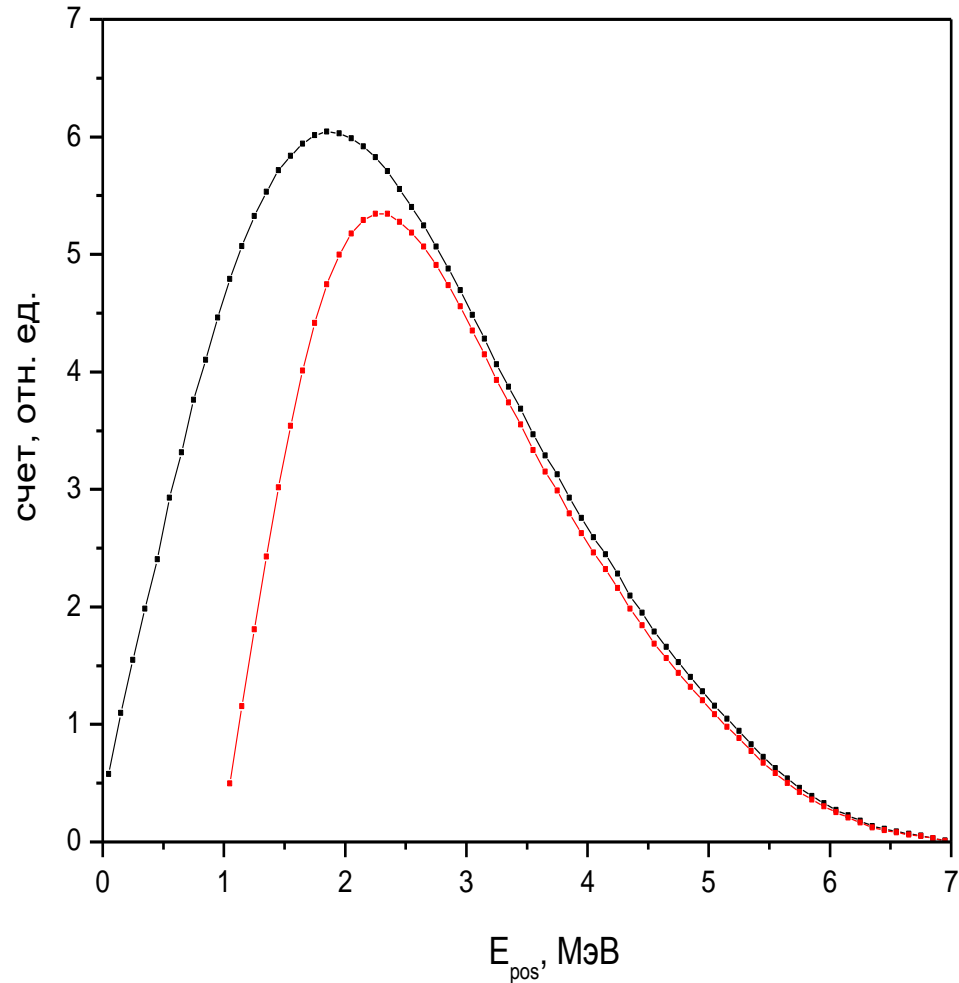
Для определения чувствительности эксперимента вычислялся χ^2 для гипотезы отсутствия осцилляций. Искомая область чувствительности – это область, в которой $\chi^2/\text{DoF} > 2.6$ (3 степени свободы, 95% CL).

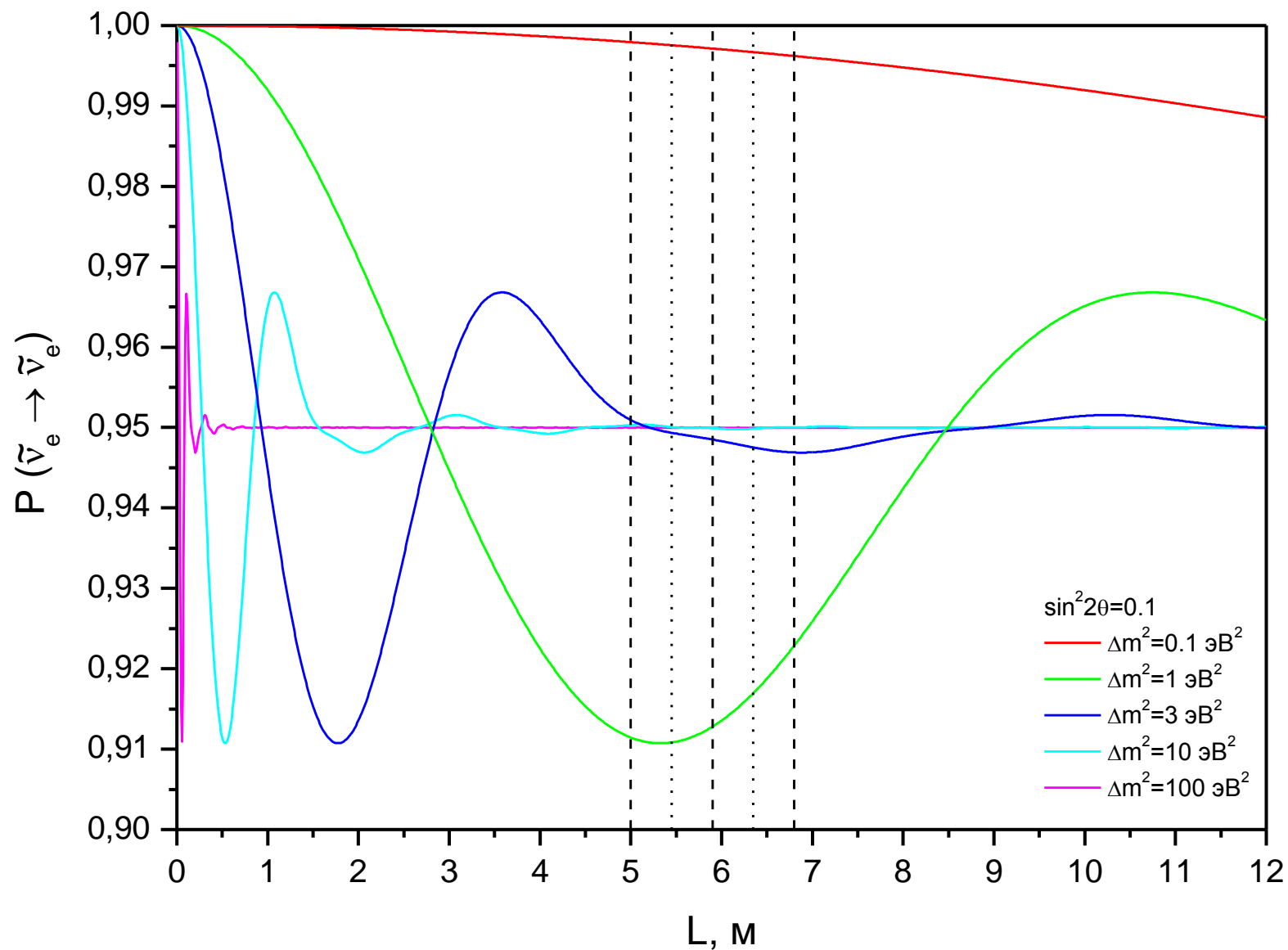
Определение чувствительности эксперимента по поиску стерильного нейтрино на реакторе ВВР-М

Спектр позитронов реакции



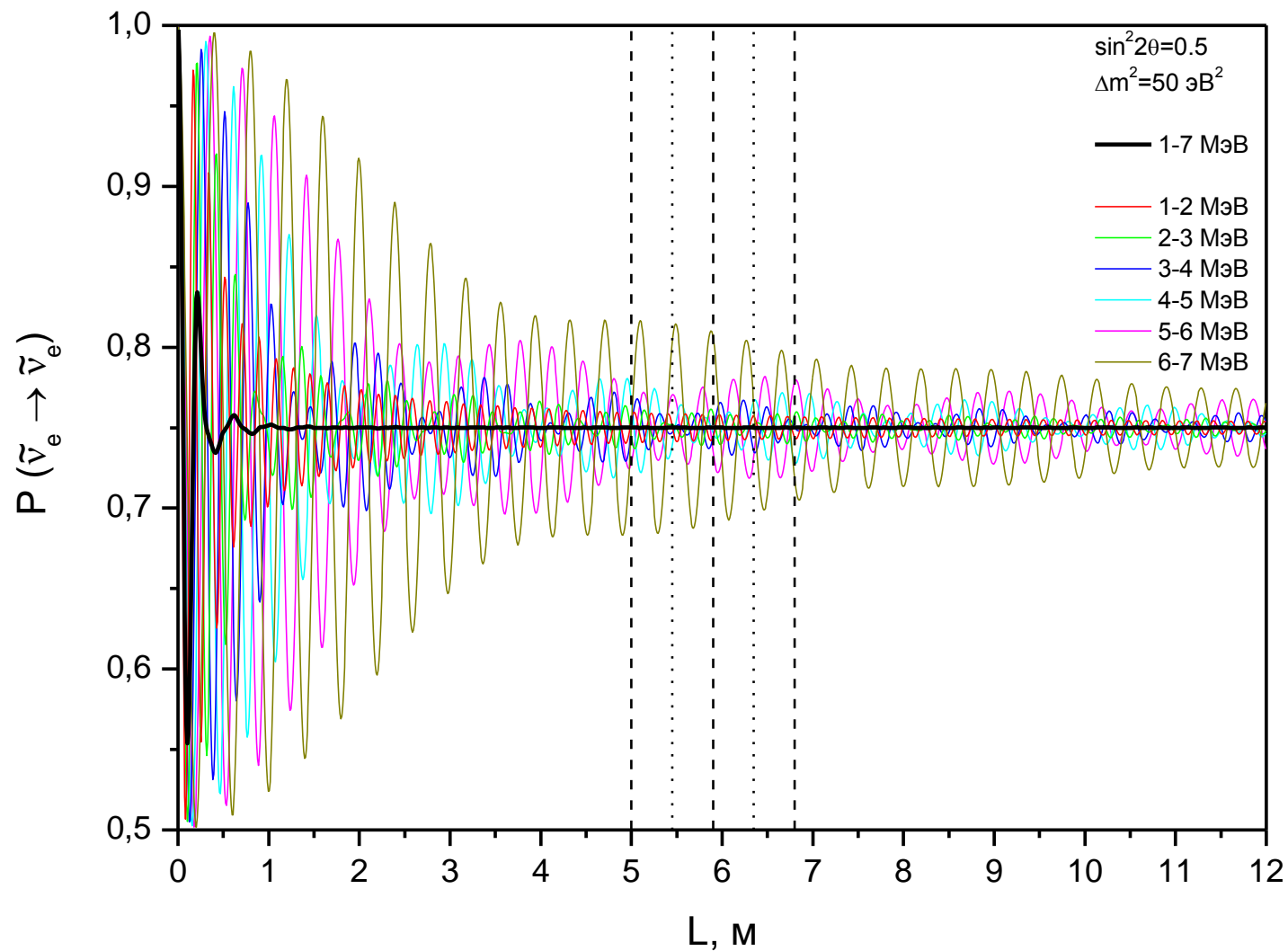
: черная кривая – реальный спектр,
красная кривая – регистрируемый
спектр.





Осцилляции реакторных антинейтрино для разных параметров осцилляций

$\sin^2 2\theta$ и Δm^2

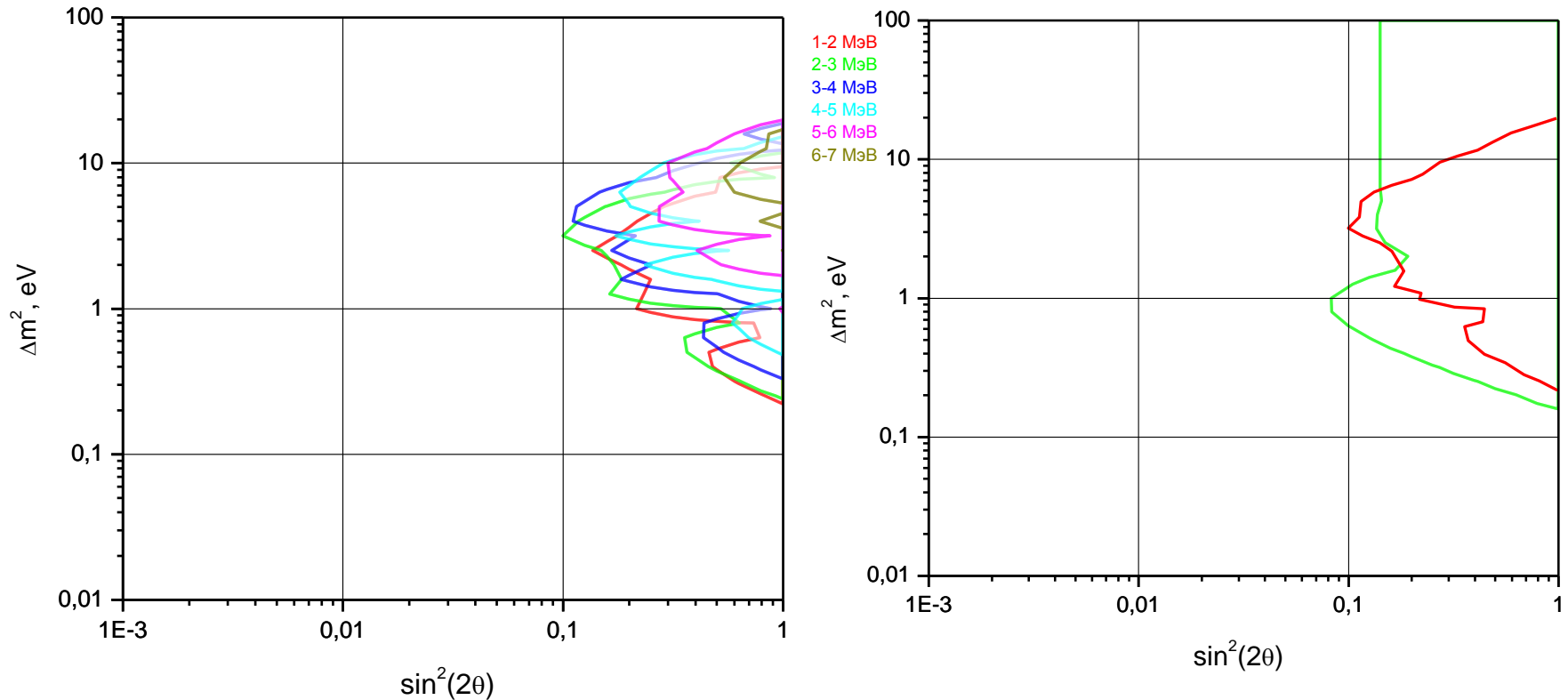


Осцилляции реакторных
антинейтрино при

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

для разных интервалов спектра позитронов

Определение чувствительности эксперимента NEUTRINO-4 на реакторе ВВР-М

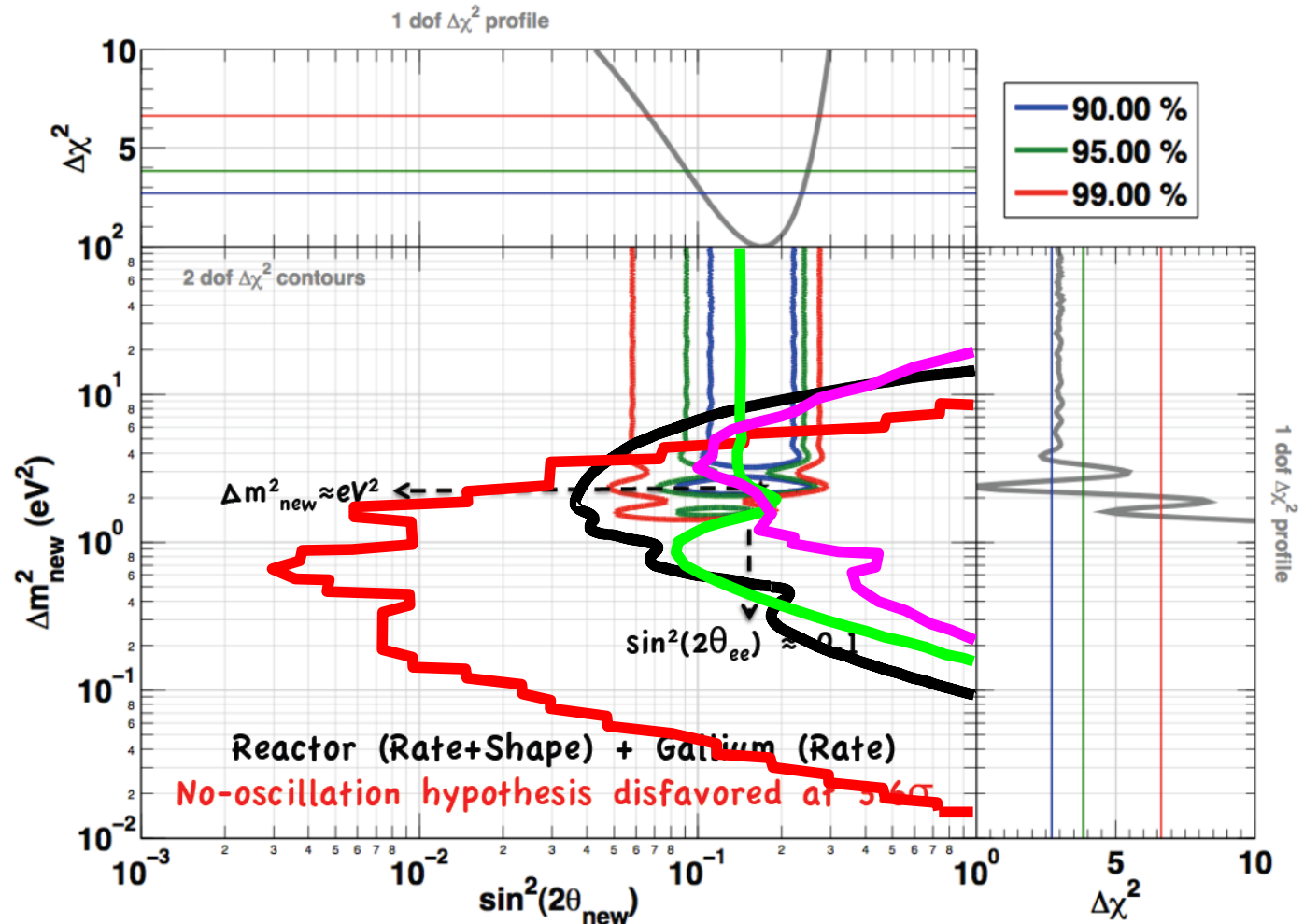


Область чувствительности эксперимента NEUTRINO-4 за 1 год измерений 95% CL:

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;
чёрная кривая – проект STEREO (ILL),
красная кривая – проект DANSS (ВВЭР-1000).

Эксперимент **NEUTRINO-4**

*по поиску стерильного
нейтрино*

на SM-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

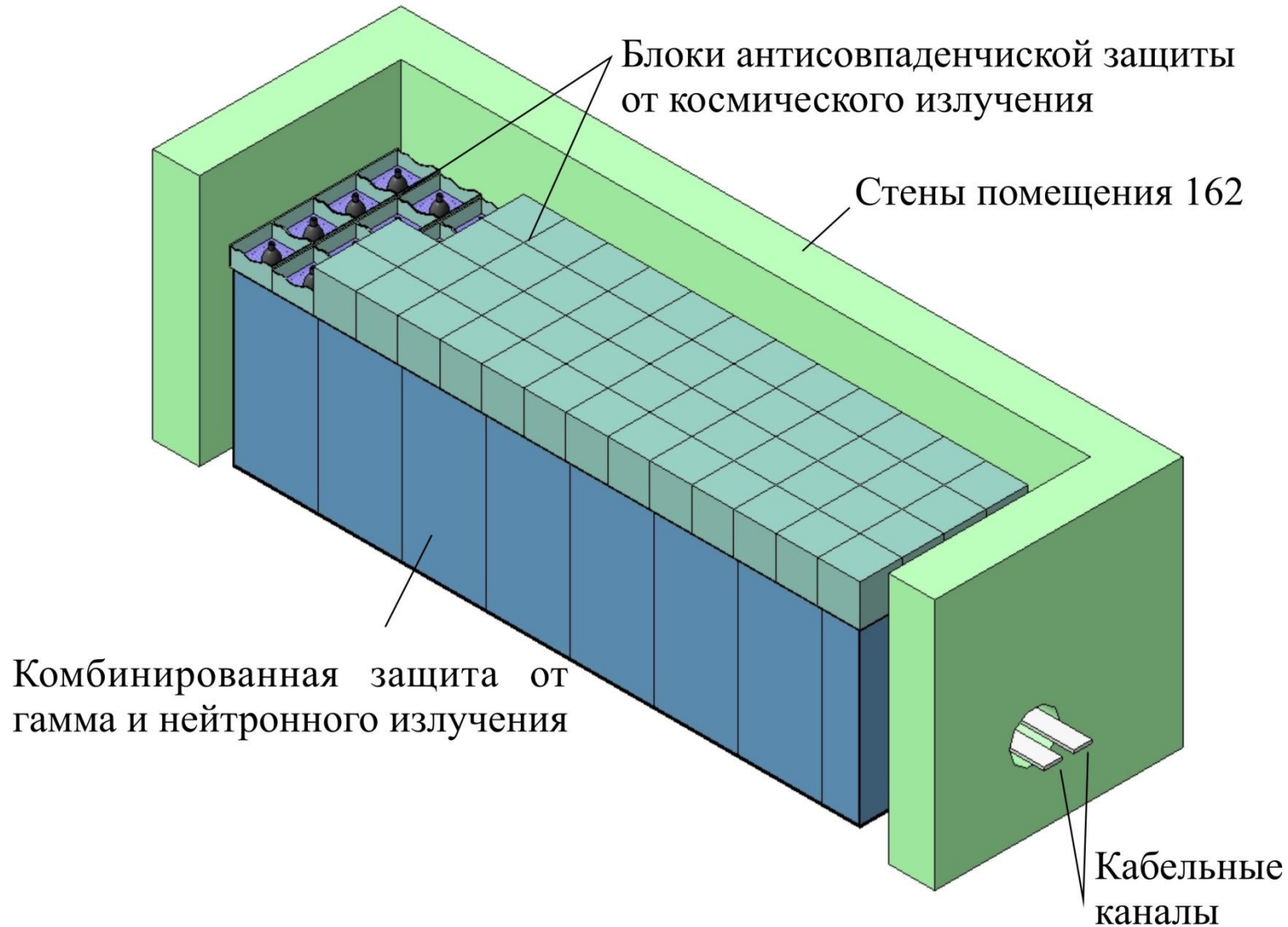


Neutron background in shielding (CH₂ + B, concrete, Pb +B)

Shielding factor - 10⁴ - 10⁵

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

Проект детектора на реакторе СМ-3



Проект детектора на реакторе СМ-3

Стены помещения 162

Свинцовая защита 6см

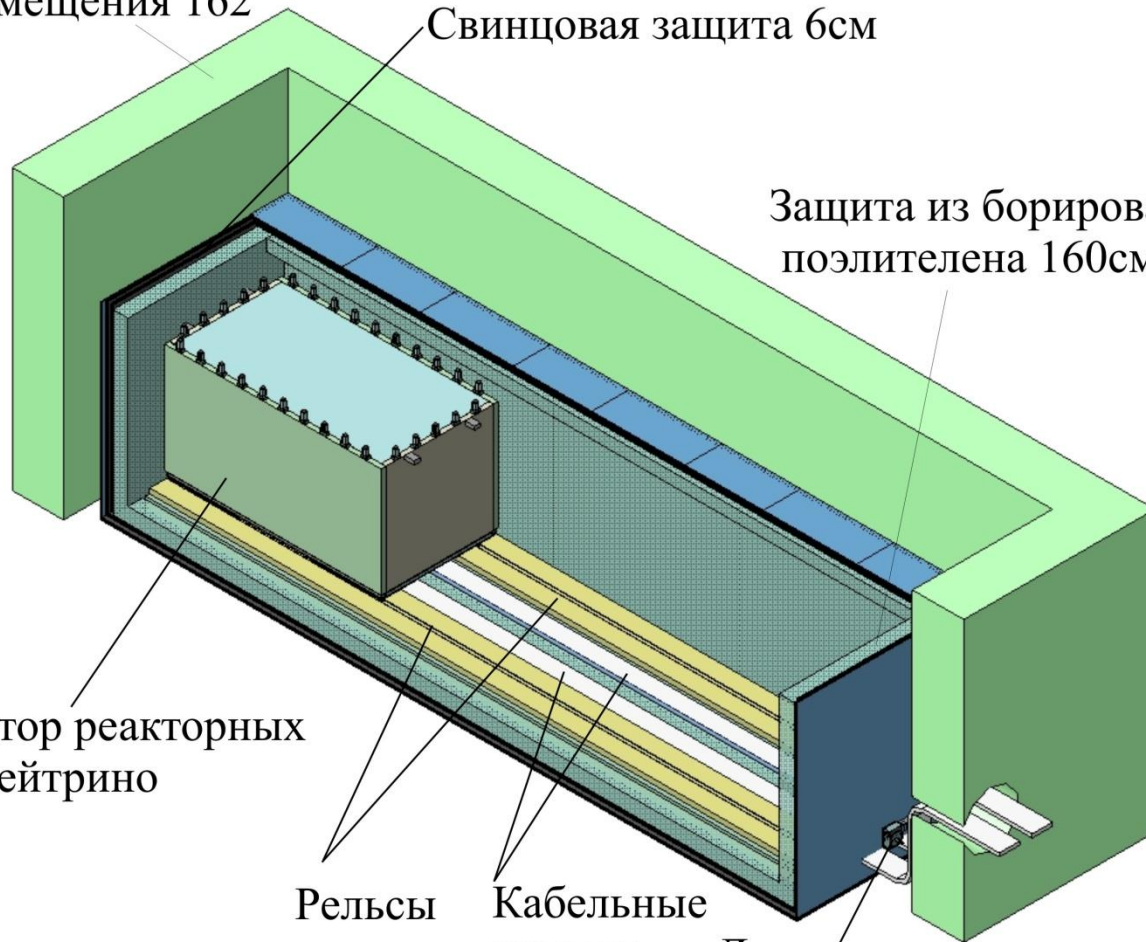
Защита из борированного
поэлителена 160см

Детектор реакторных
антинейтрино

Рельсы

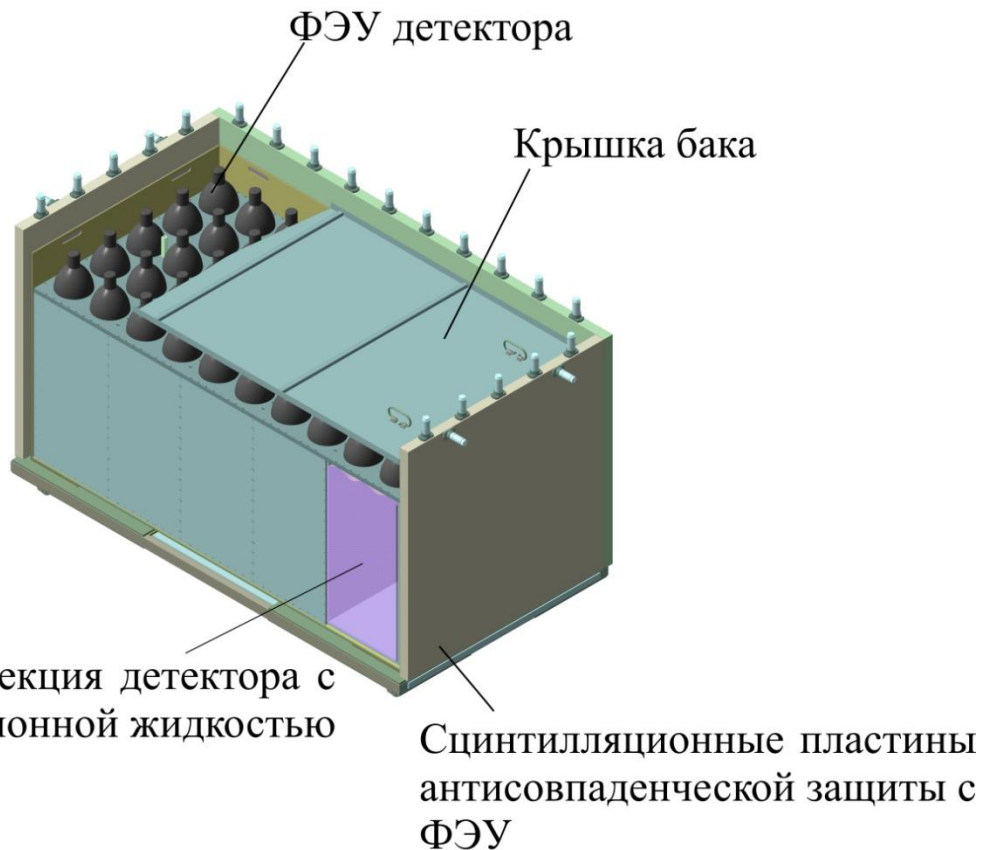
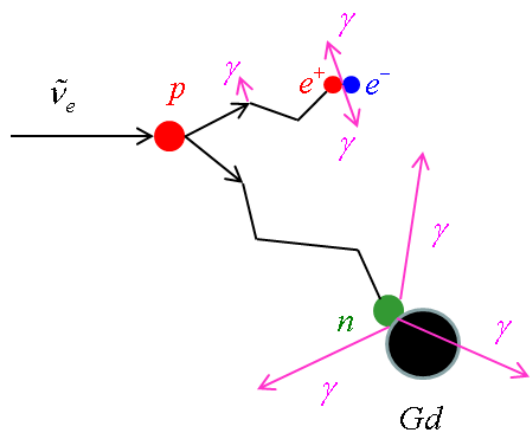
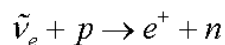
Кабельные
каналы

Двигатель для
перемещения детектора

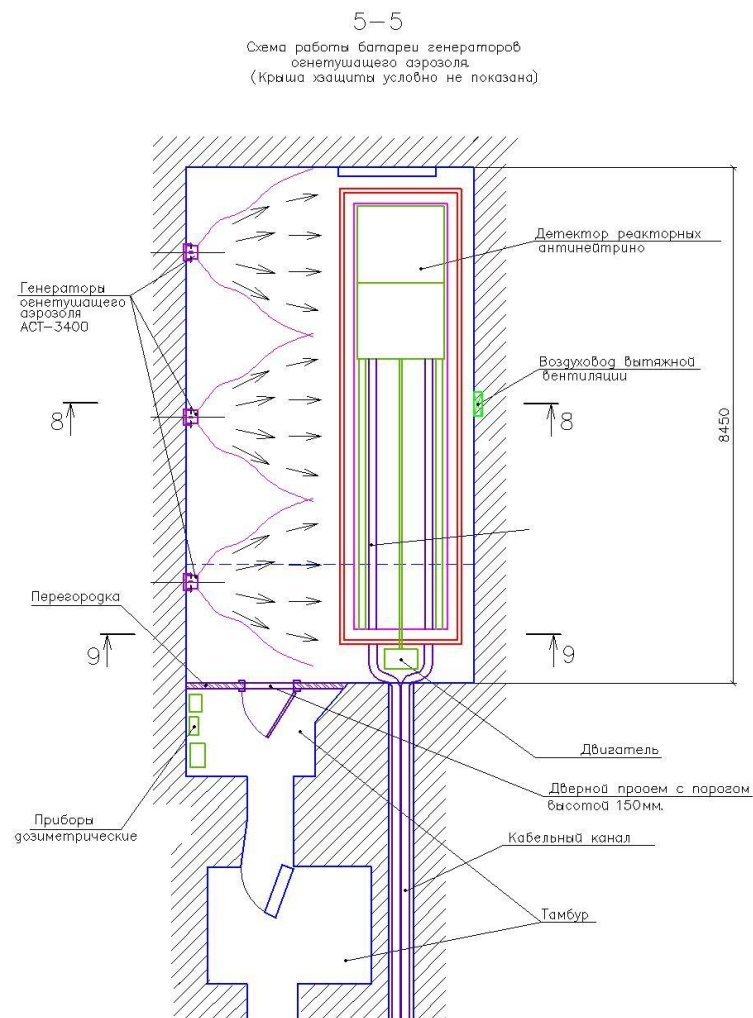
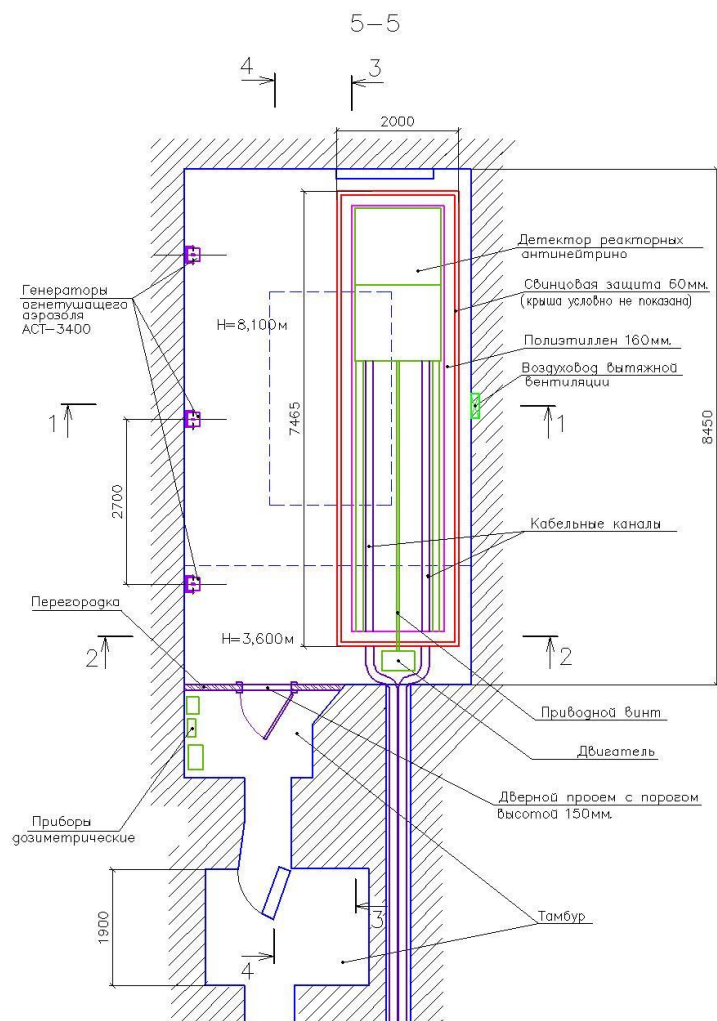


Проект детектора на реакторе СМ-3

Регистрация антинейтрино

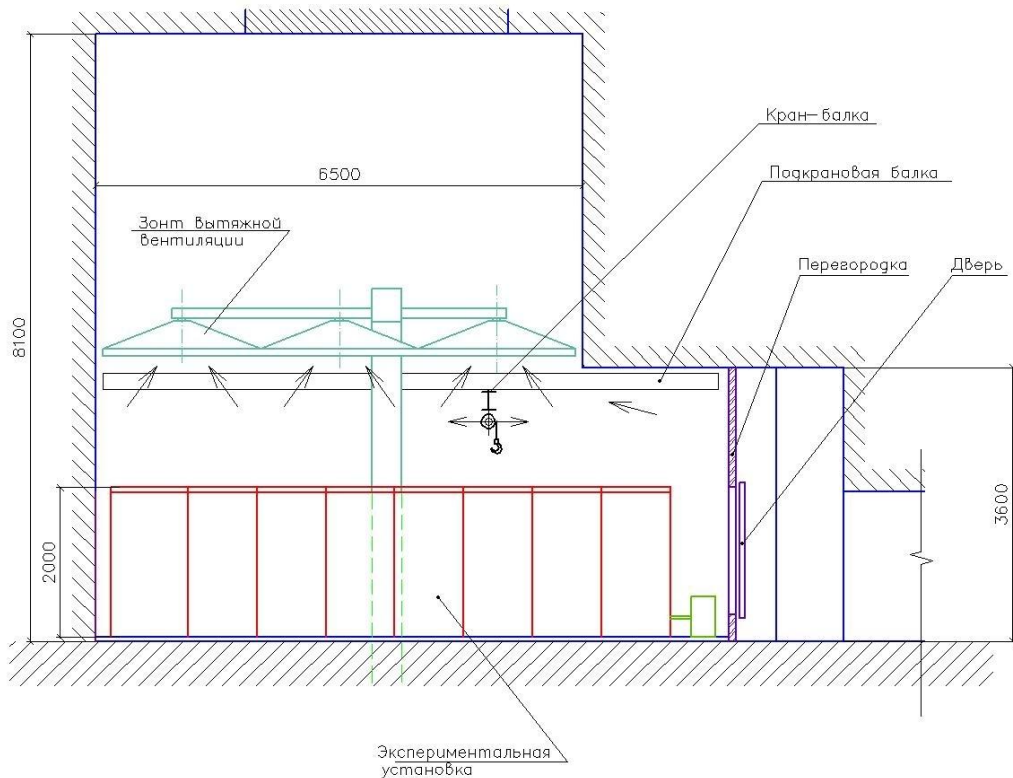


Проект детектора на реакторе СМ-3

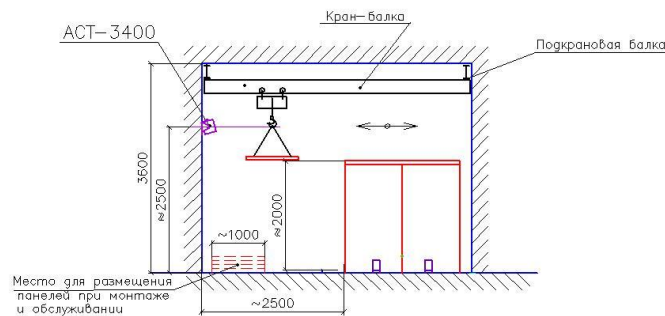
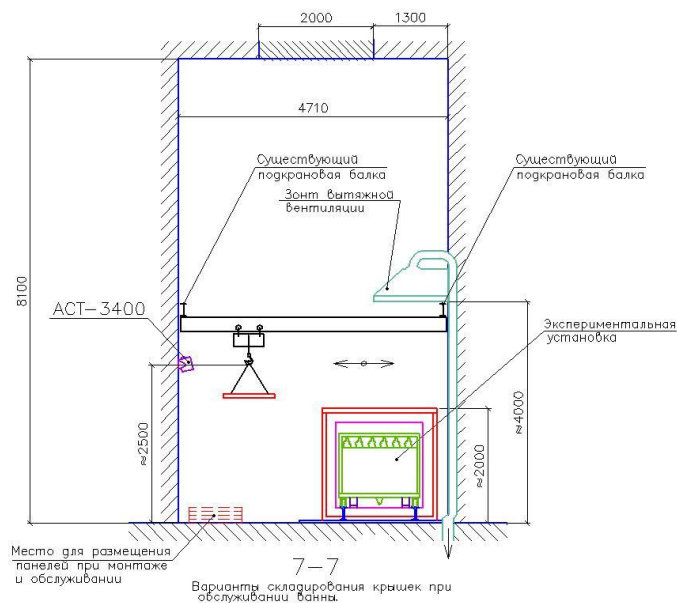


Проект детектора на реакторе СМ-3

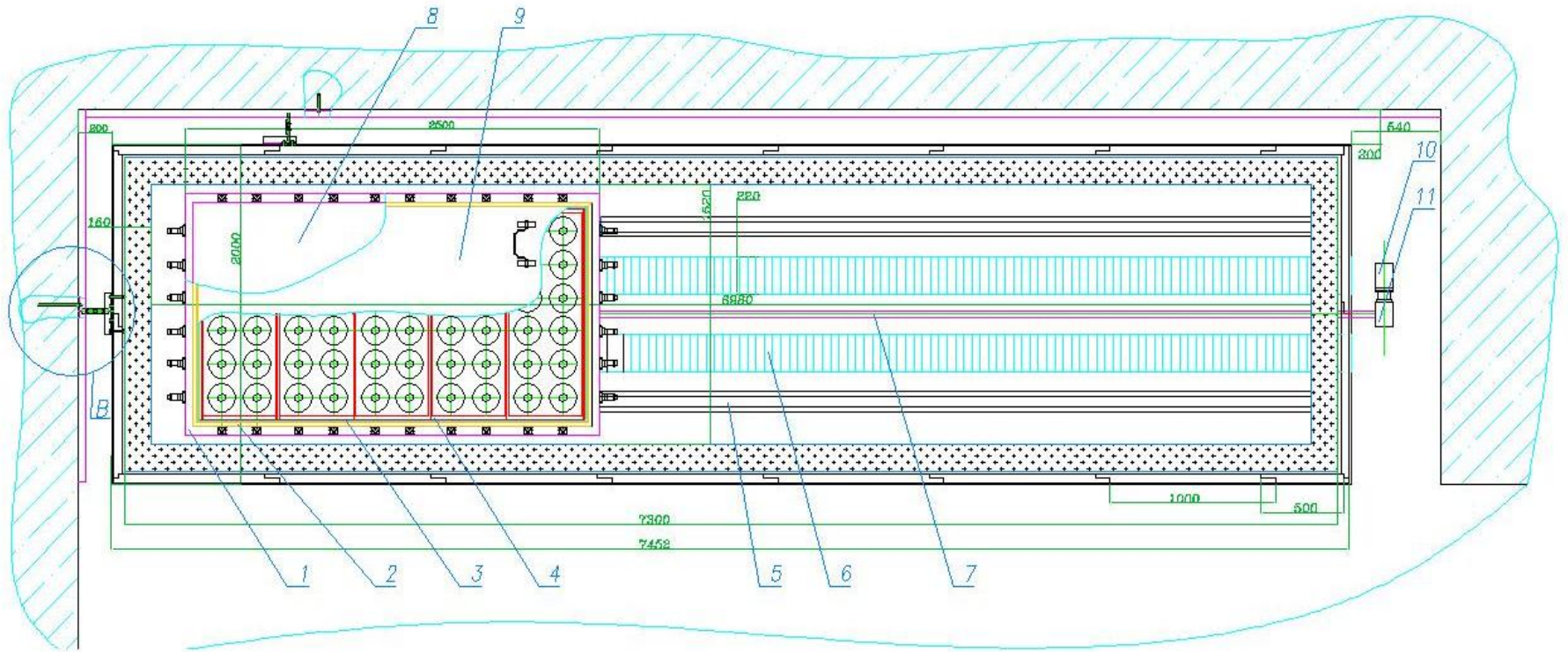
4-4
Схема вытяжной вентиляции



6-6
Схема перемещения крышек при обслуживании экспериментальной установки



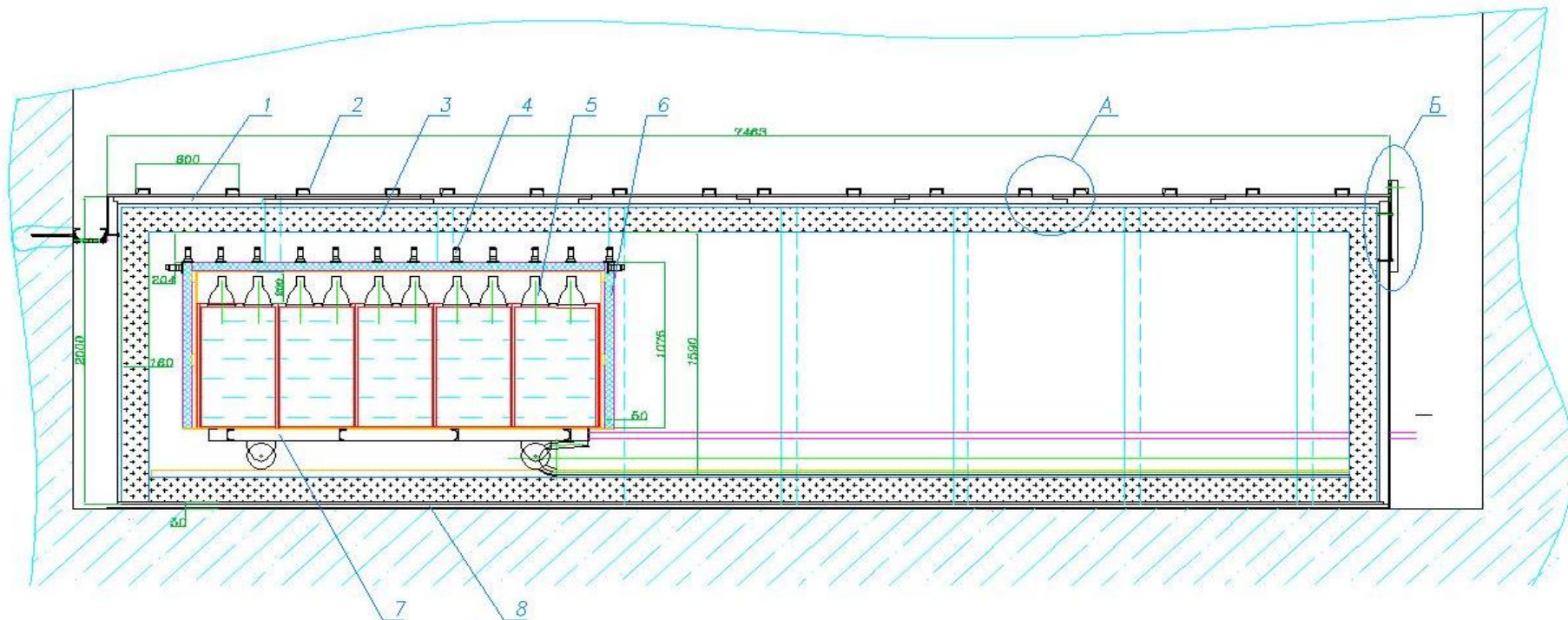
Вид сверху



- 1 – листы сцинтилляционной защиты с ФЭУ
- 2 – бак нержавеющей
- 3 – вкладыш тефлоновый
- 4 – бак фторопластовый с ФЭУ
- 5 – рельсы
- 6 – кабель-канал SB 028N

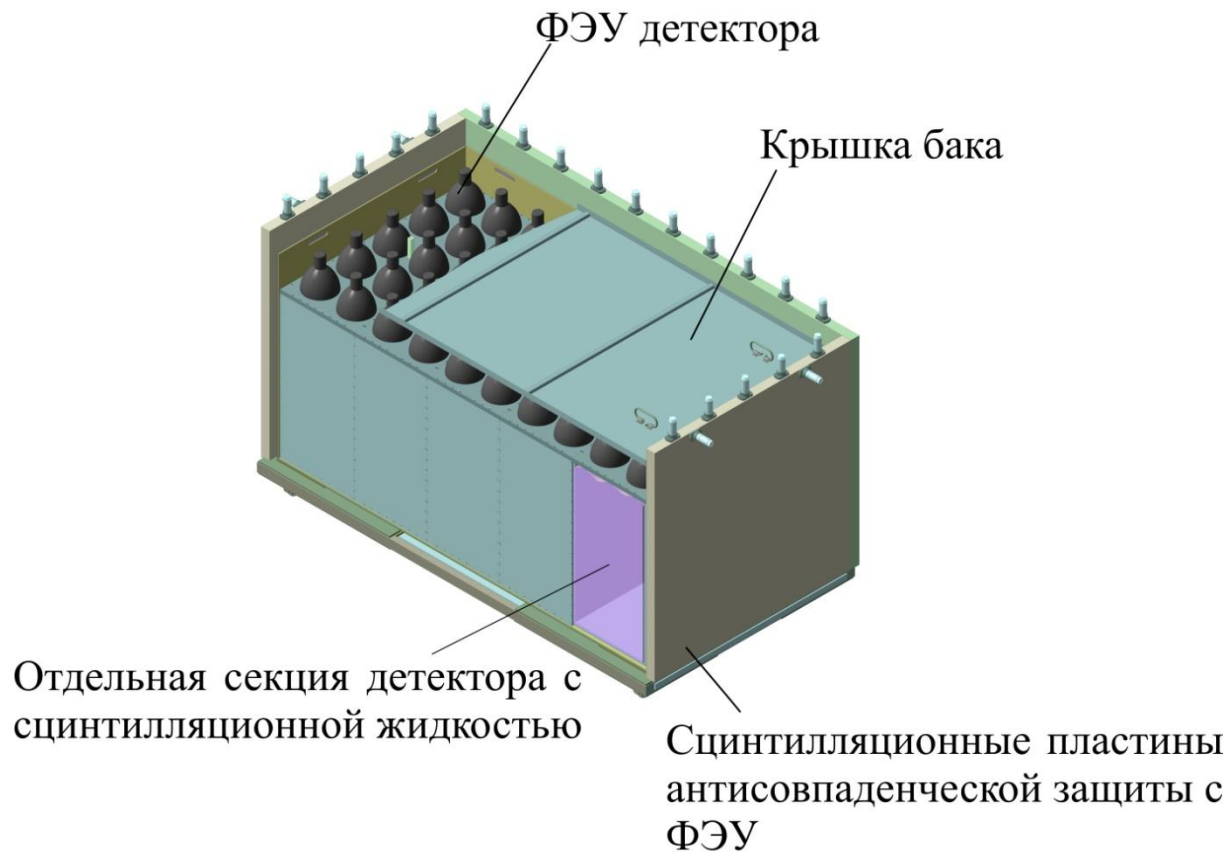
- 7 – шариковинтовая передача
- 8 – лист сцинтилляционной защиты с ФЭУ
- 9 – крышка нержавеющей бака
- 10 – Двигатель шаговый FL 110 STN 150-6504A
- 11 – Редуктор 64-63 ES-50-56-2-1-П-УЗ

Вид сбоку

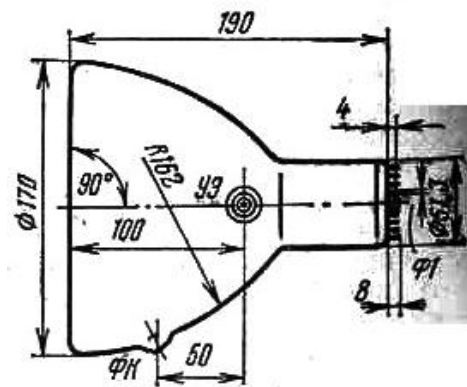
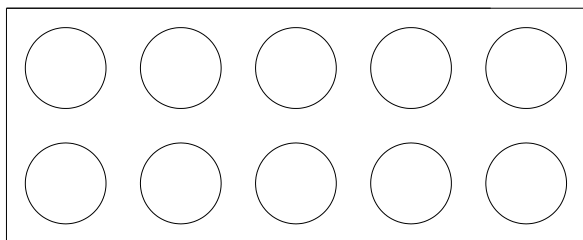
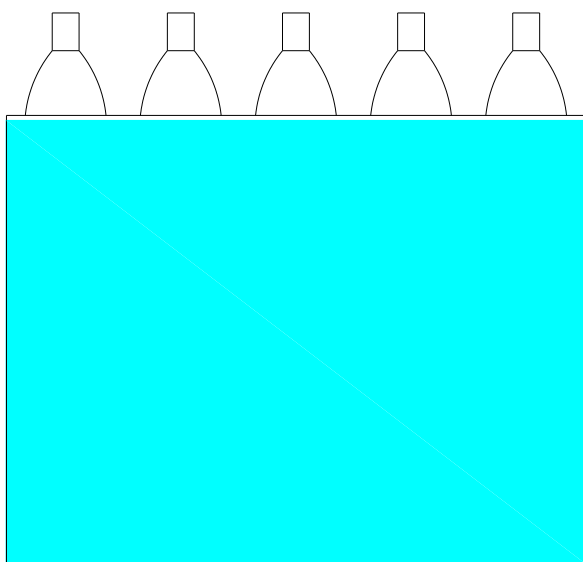


- 1 – блок защиты
- 2 – швеллер для усиления блока защиты
- 3 – полиэтилен
- 4,5 – ФЭУ
- 6 – лист сцинтилляционной защиты
- 7 – телега
- 8 – свинцовая защита пола

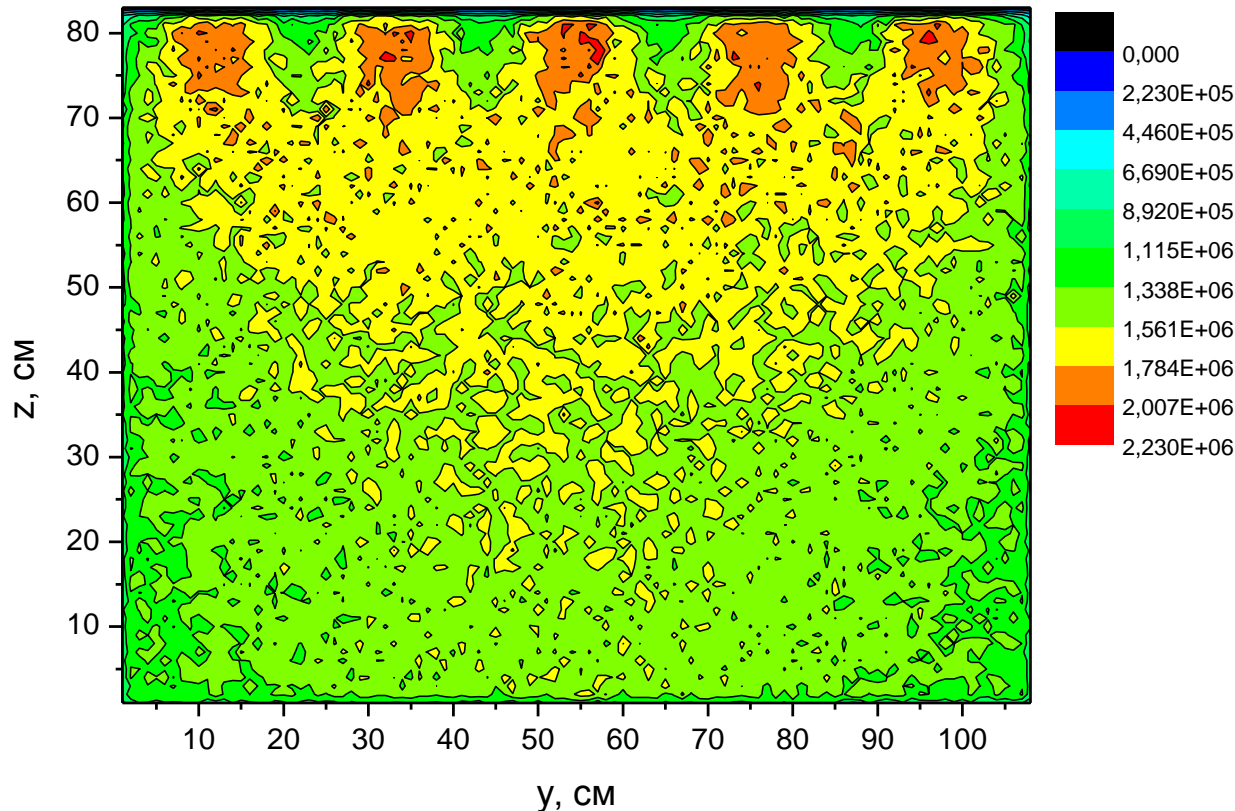
Пяти-секционный передвижной детектор антинейтрино



Состав отдельной секции

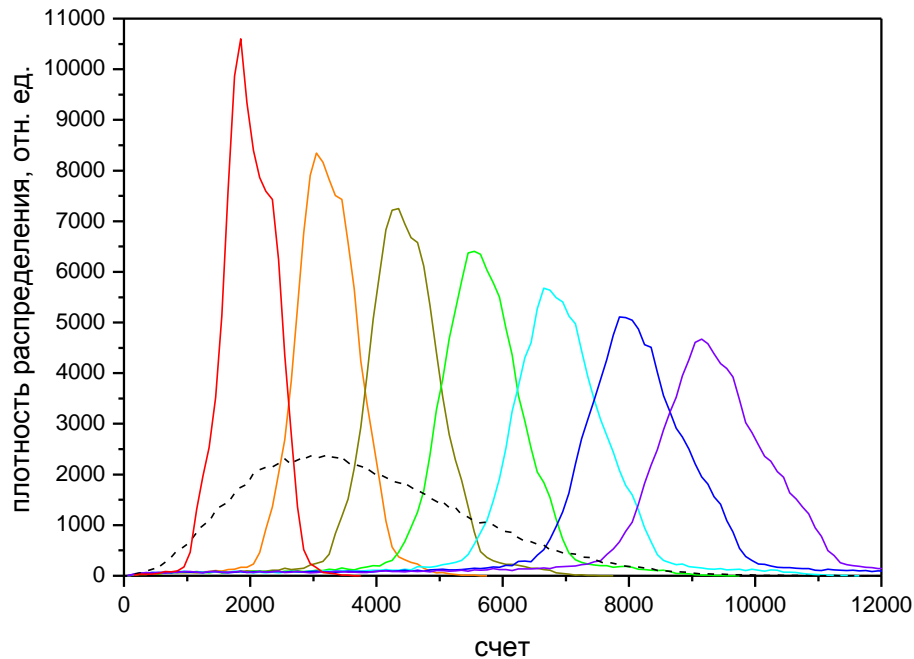


Моделирование детектора реакторных антинейтрино на реакторе СМ-3 (неравномерность светосбора)

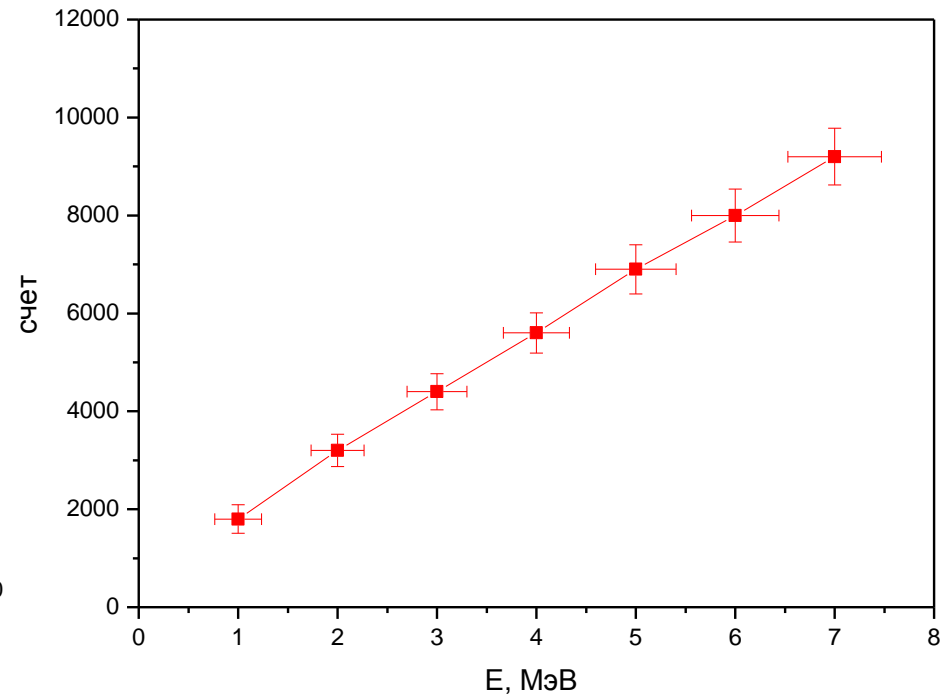


Число фотонов пришедших на ФЭУ секции детектора в зависимости от места рождения позитрона с энергией 4 МэВ.

Моделированное энергетическое разрешение

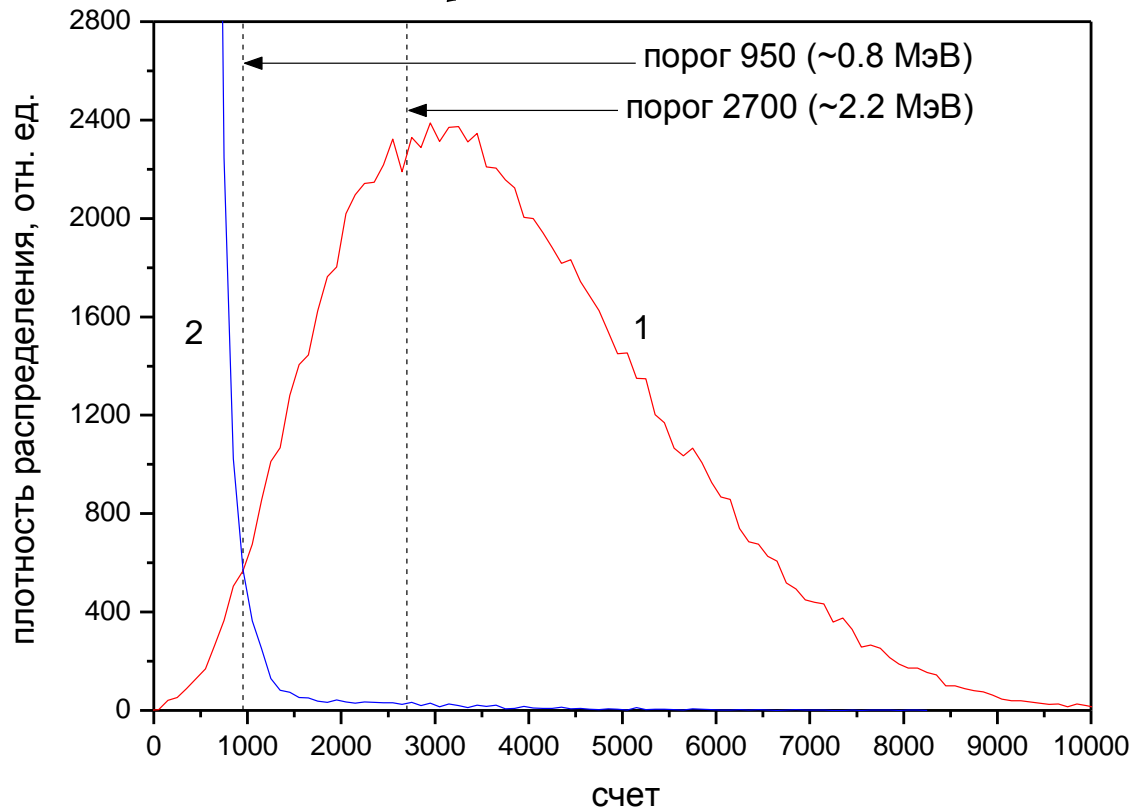


Распределение счета ФЭУ от позитронов с энергией от 1 до 7 МэВ. Штриховая линия – распределение для спектра позитронов.



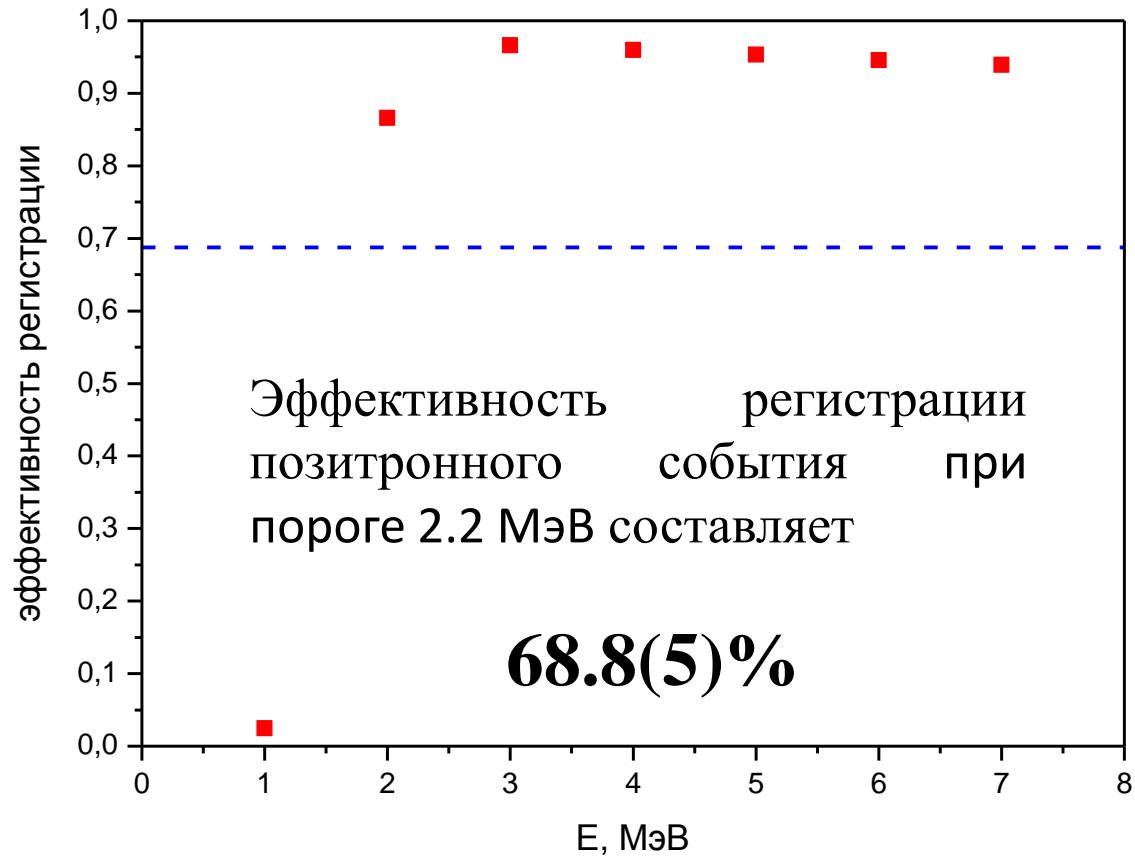
Зависимость для восстановления энергии позитрона по счету ФЭУ

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.

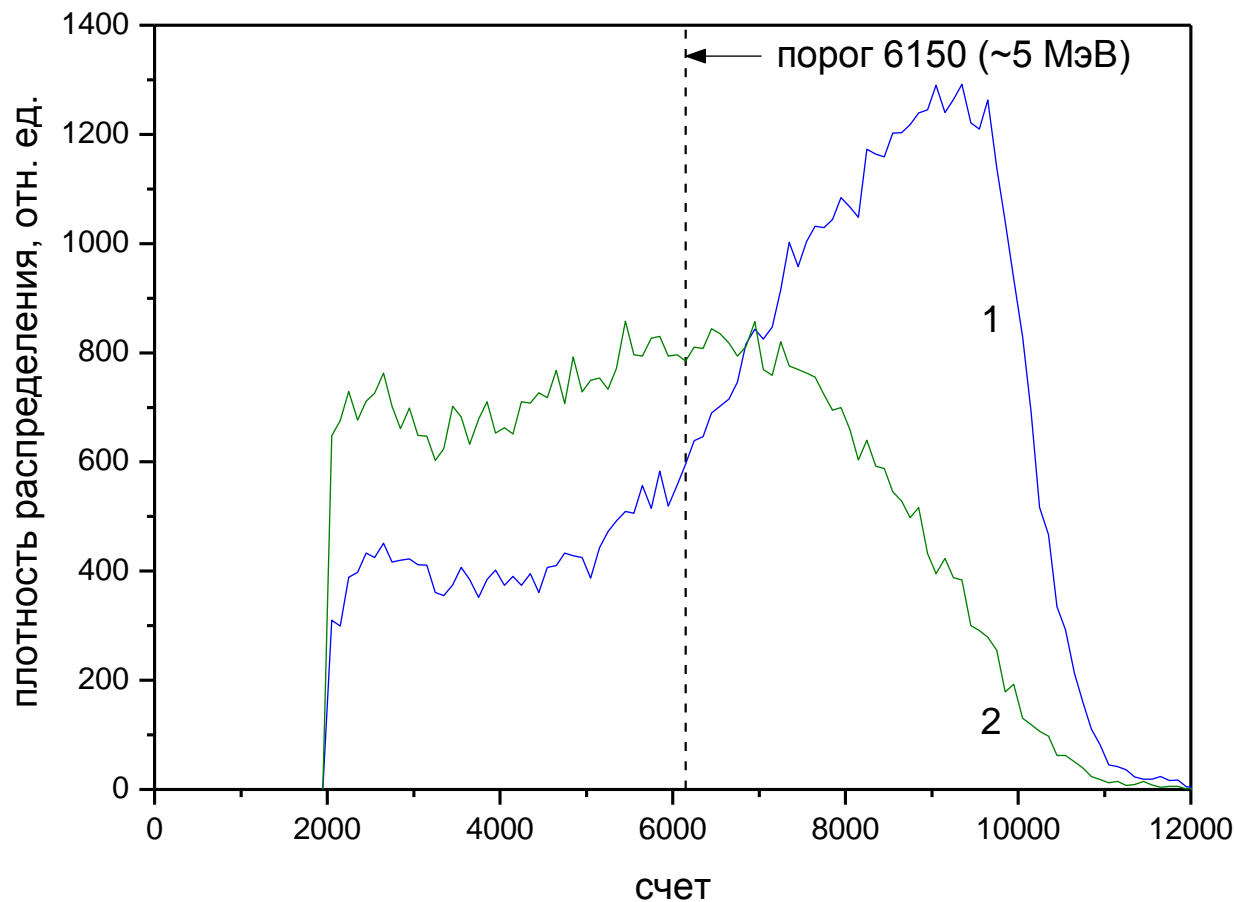
Эффективность регистрации позитронного события в зависимости от энергии позитрона при пороге 2.2 МэВ.



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

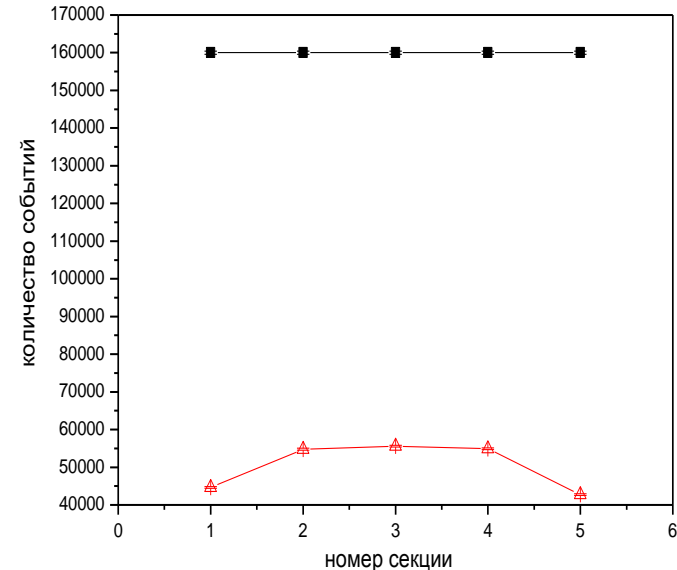
Эффективность регистрации нейтронного сигнала ε_n в средней секции детектора при нейтронном пороге 5МэВ составляет **61.6(5)%**.

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

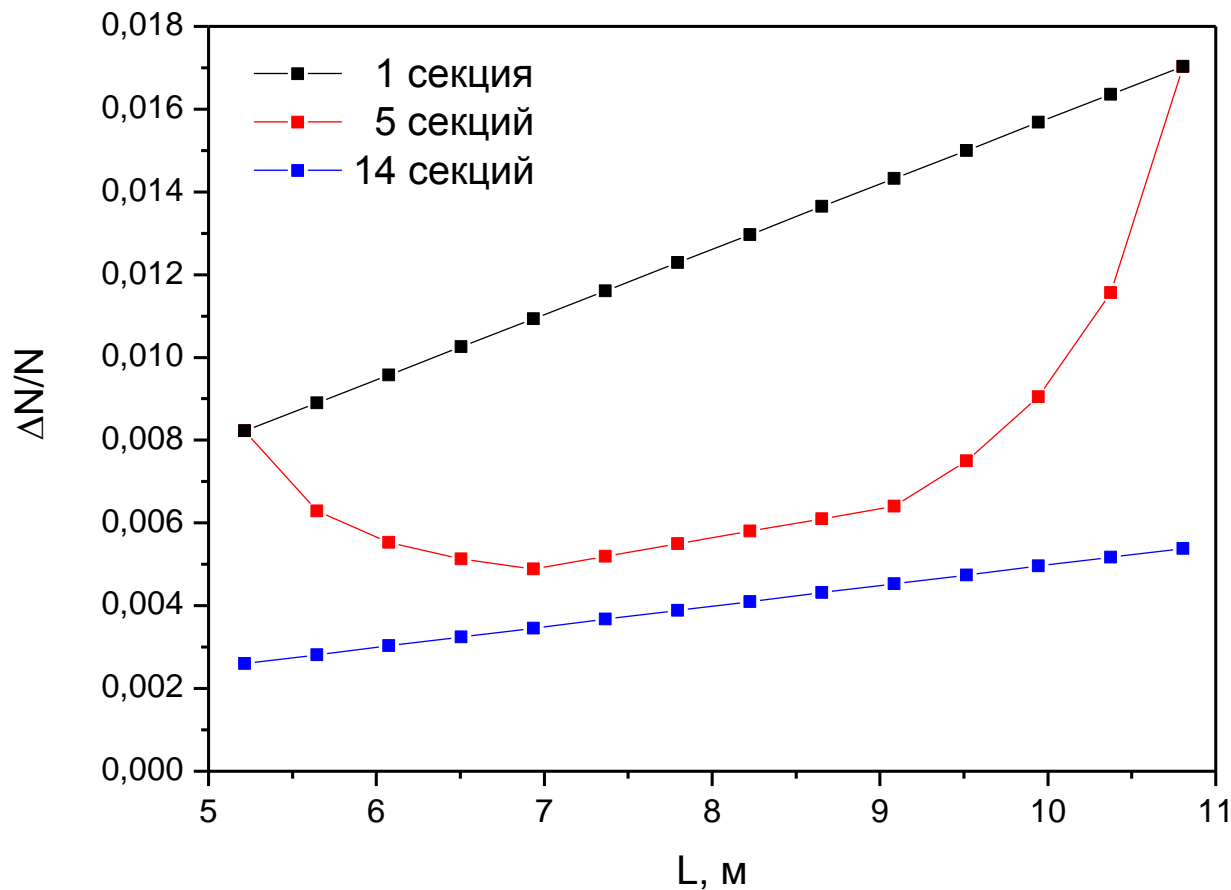
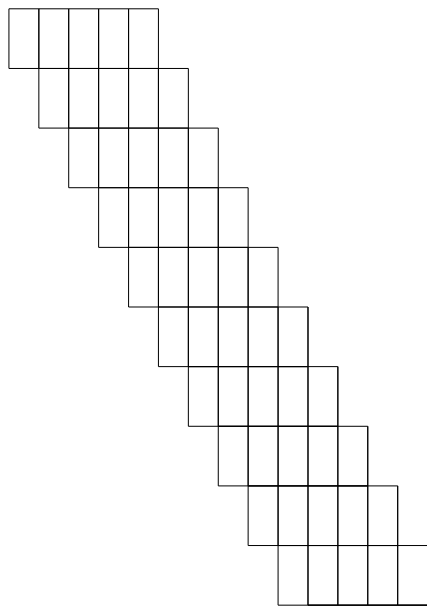
34.8(5)%



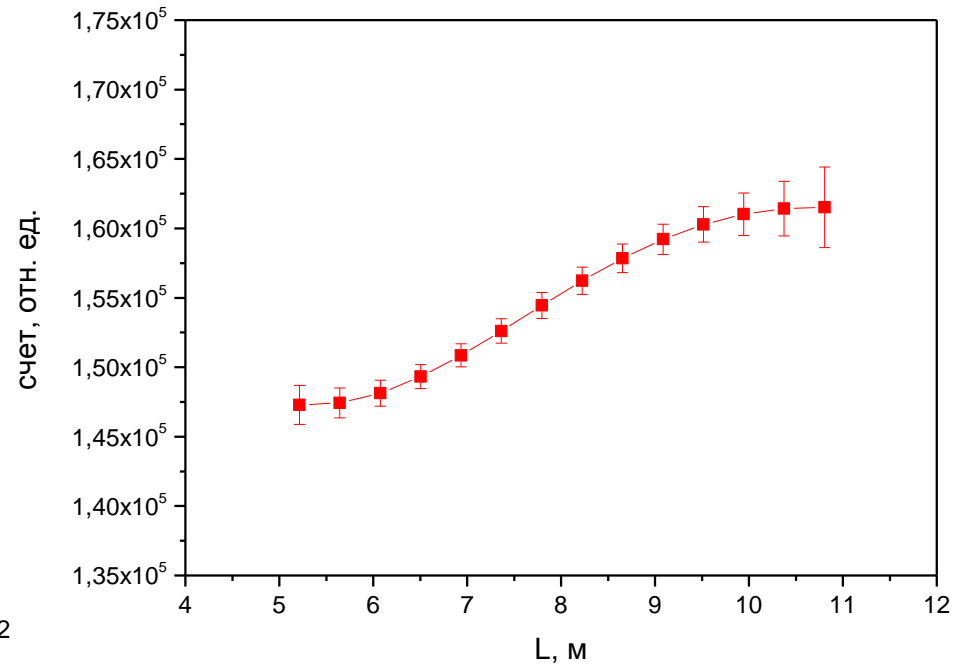
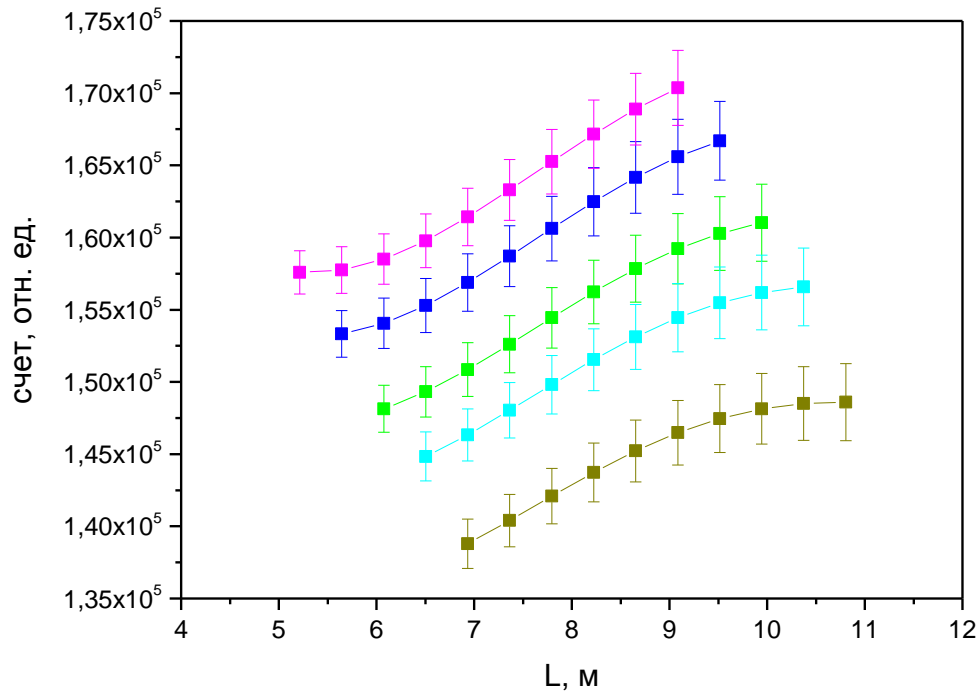
Распределение событий по секциям. ■ — фактические события (равномерное распределение), Δ — определение места события в результате моделирования.

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 ~ 2.2 МэВ), нейтронного сигнала 49.3(5)% (порог ~ 5 МэВ).

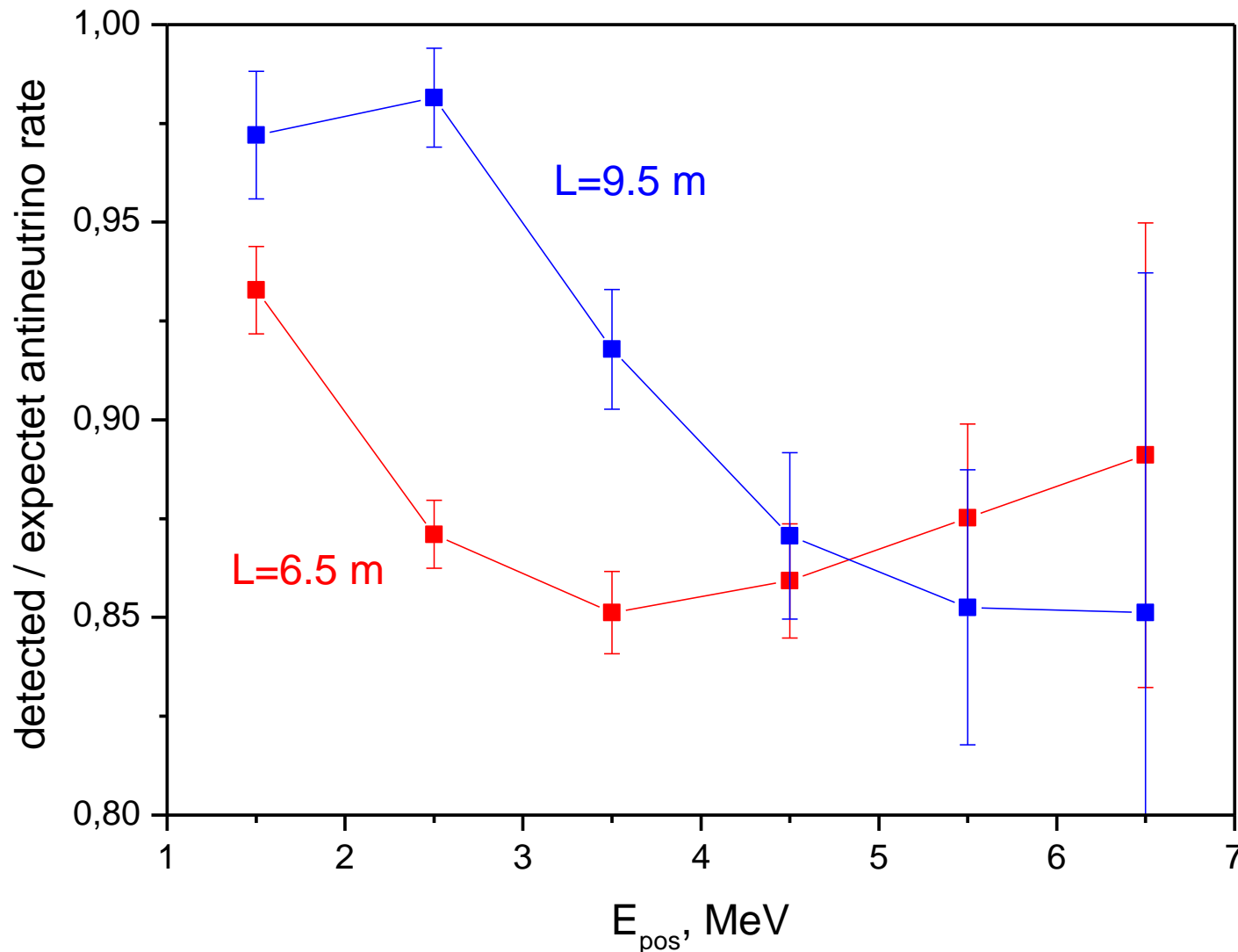
Схема простого перемещения, статистическая точность и сравнение методов



*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 м³, 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·м³) на расстоянии 5 м от активной зоны.

Определение чувствительности эксперимента NEUTRINO-4 на реакторе СМ-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

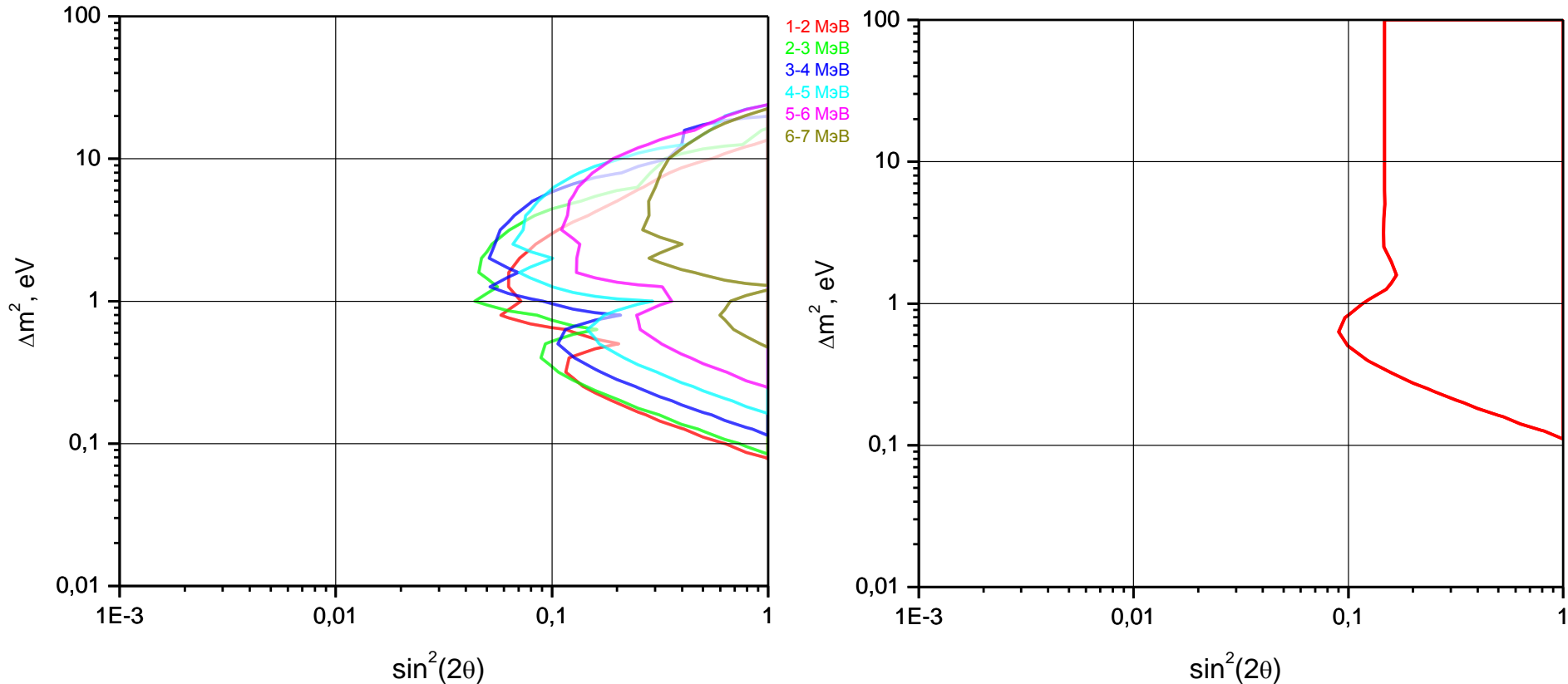
$$P(\tilde{\nu}_e \rightarrow \tilde{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{эВ}^2] L [\text{м}]}{E_{\tilde{\nu}} [\text{МэВ}]} \right)$$

Для определения чувствительности эксперимента вычислялся χ^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*

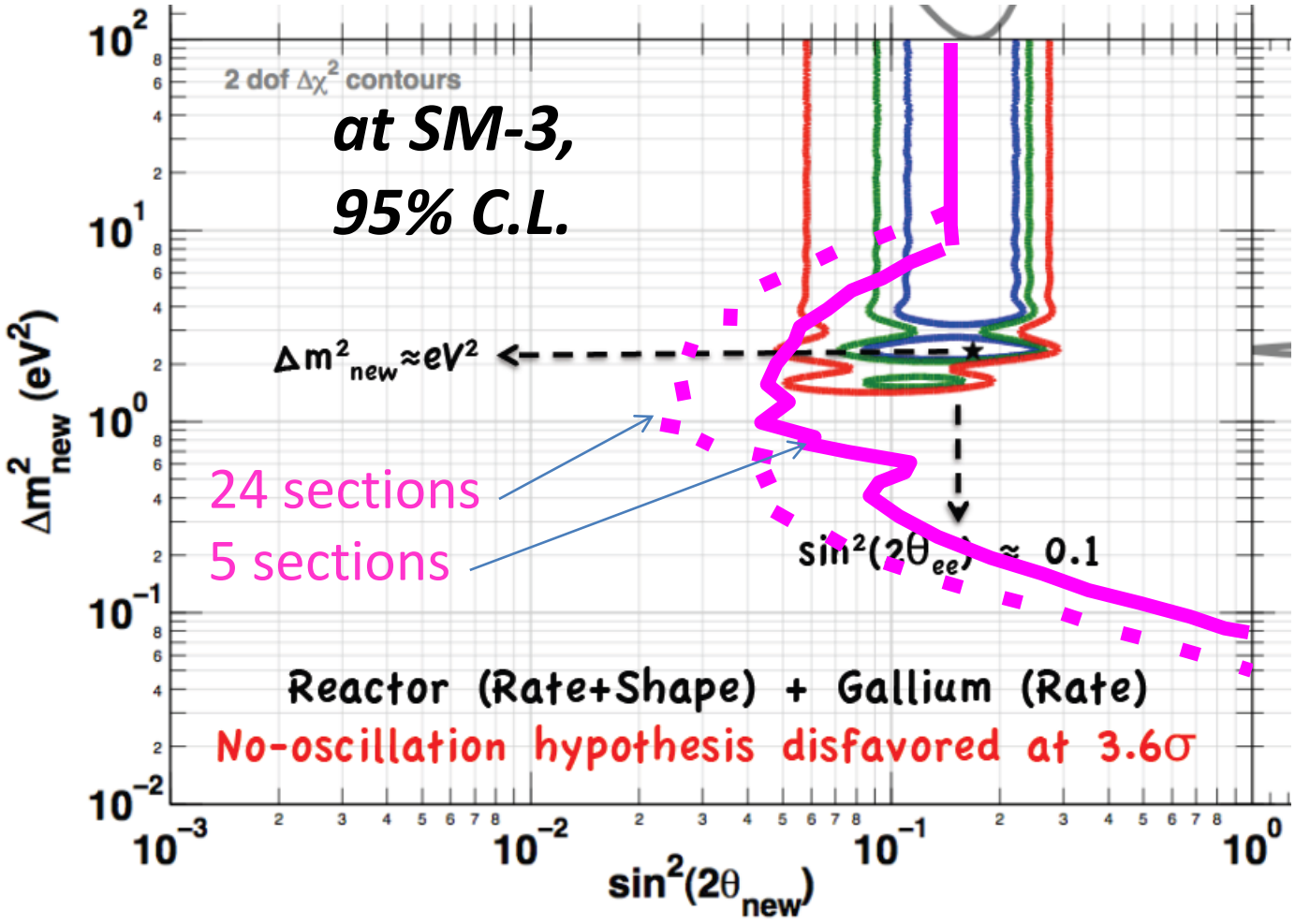
Чувствительность определялась 2-я методами. **Дифференциальный метод** – сравниваются измеренные поток и спектр антинейтрино между различными секциями детектора. **Интегральный метод** - сравниваются измеренные поток и спектр антинейтрино с расчетными. При определении чувствительности интегральным методом 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

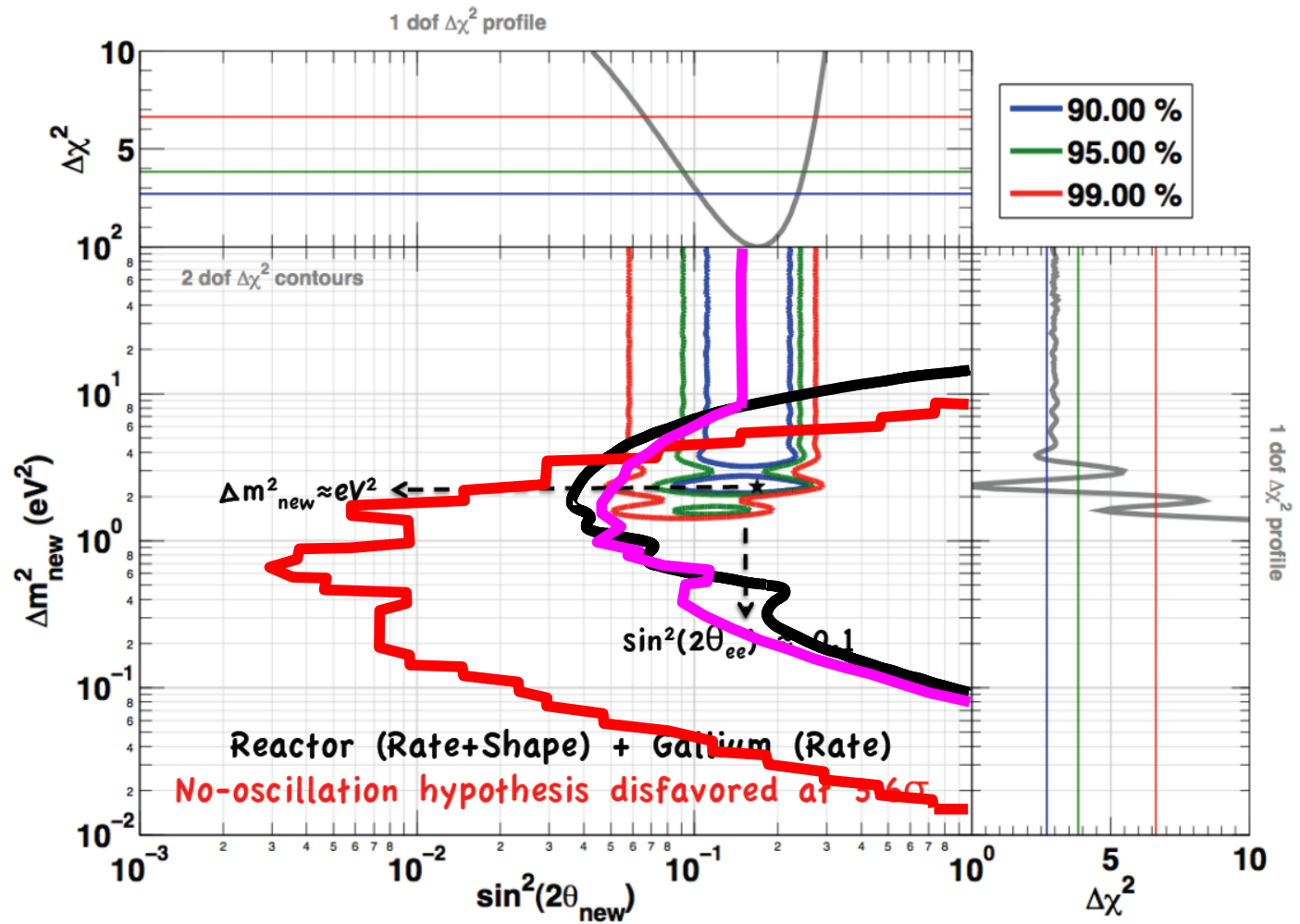


Область чувствительности эксперимента NEUTRINO-4 к параметрам осцилляций за 1 год измерений 95% CL: а - при дифференциальном методе для разных интервалов спектра позитронов реакции $\tilde{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$; б - при интегральном методе.

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



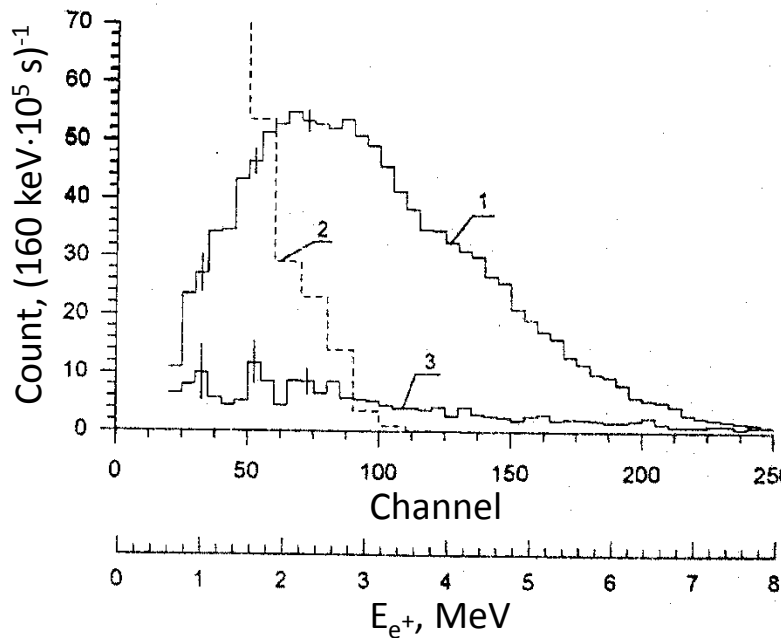
Сравнение областей чувствительности эксперимента НЕЙТРИНО-4 на реакторе СМ-3 по поиску стерильного нейтрино к параметрам осцилляций



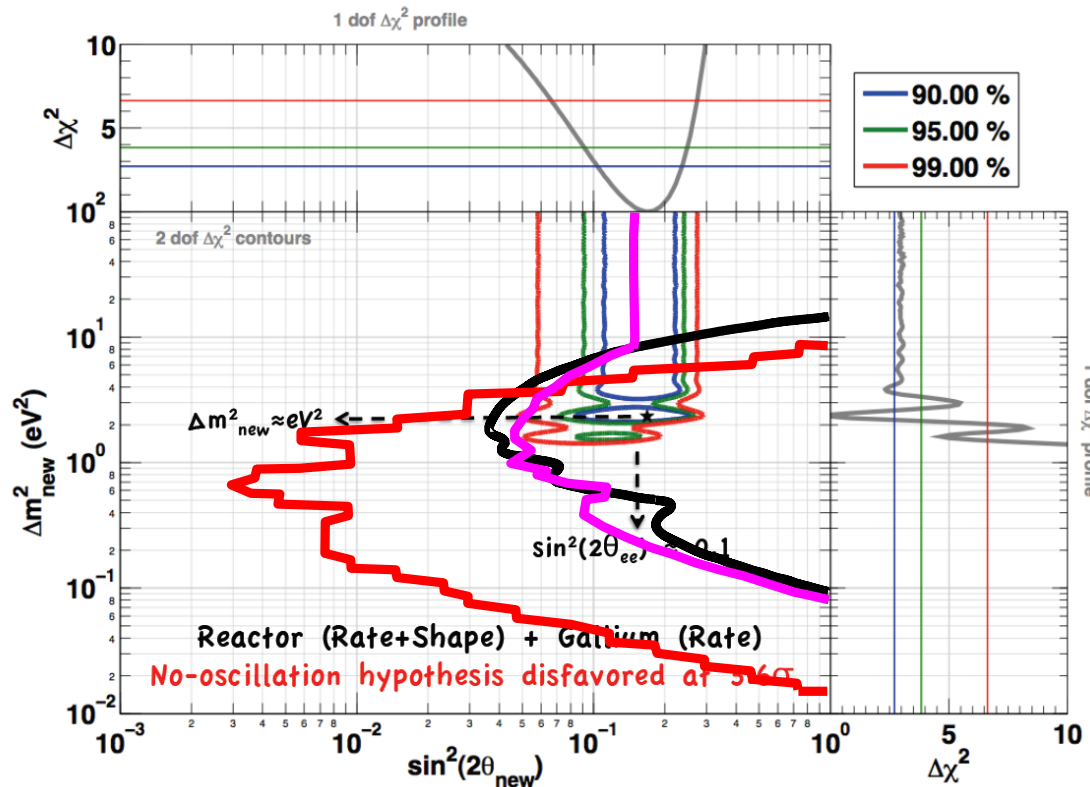
*розовая кривая – проект NEUTRINO-4; черная кривая – проект STEREO (ILL),
красная кривая – проект DANSS (ВВЭР-1000).*

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)

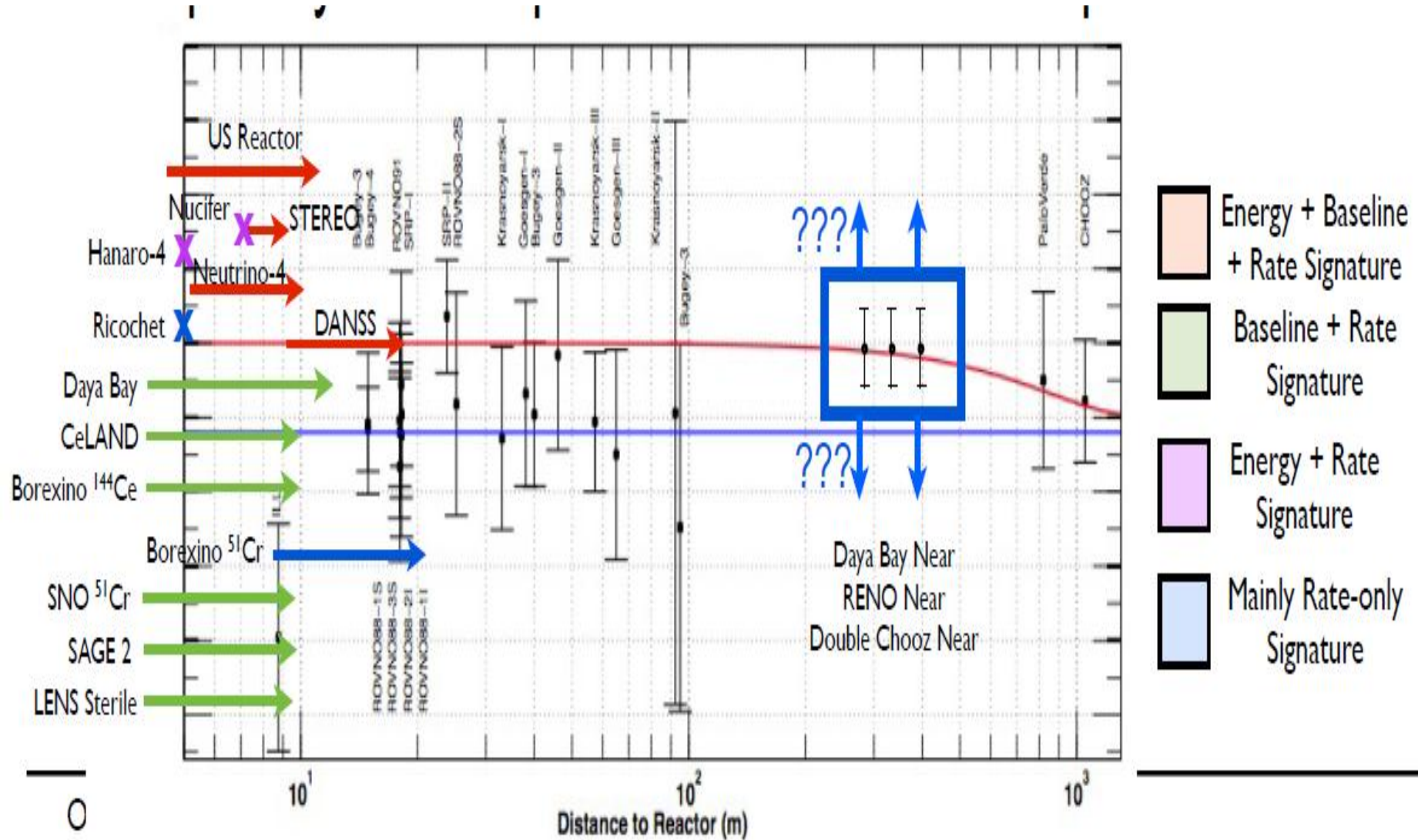


Preliminary area of sensitivity for 1 year of measurements 95% CL



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

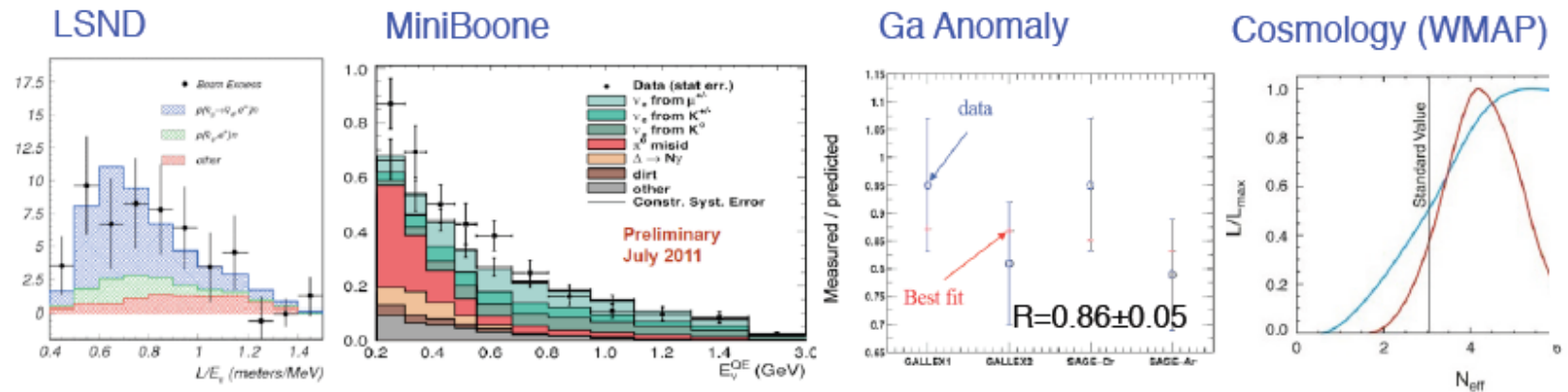
**М.Н.Святкин, А.Л.Петелин, С.А.Сазонтов, Д.К.Рязанов, М.О.Громов,
Н.С.Храмков.**

ИФВЭ

В.И.Рыкалин

Motivations Search for sterile neutrino

Neutrino Anomalies & Sterile ν Hypothesis



Anomalies in 3- ν 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 $\Delta m^2 \sim O(1\text{eV}^2)$ and $\sin^2 2\theta > 10^{-3}$

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

systematics or experimental effects?

→ need to test each experimental effect

source experiments (Lasserre)
acc experiments (Shaevitz)