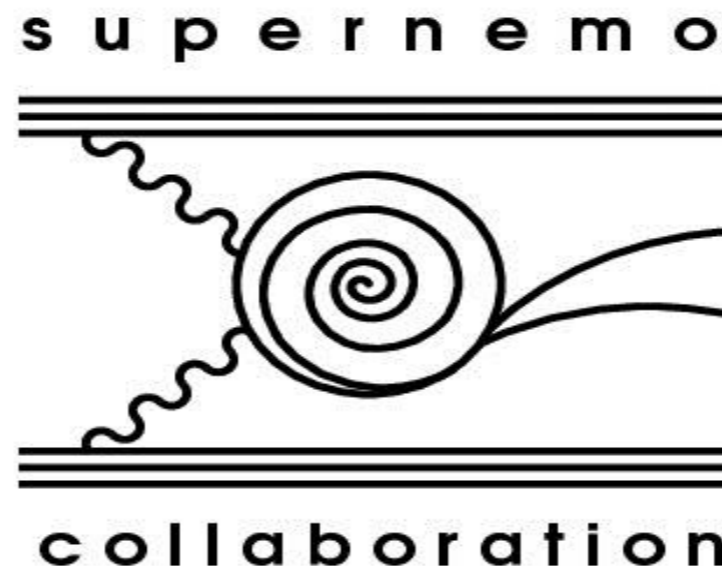


# Исследование процессов $2\beta$ -распада $Se-82$ с помощью детектора SuperNEMO

Тема 03-2-1100-2010/2018

"Неускорительная нейтринная физика и астрофизика"  
Продление проекта SuperNEMO

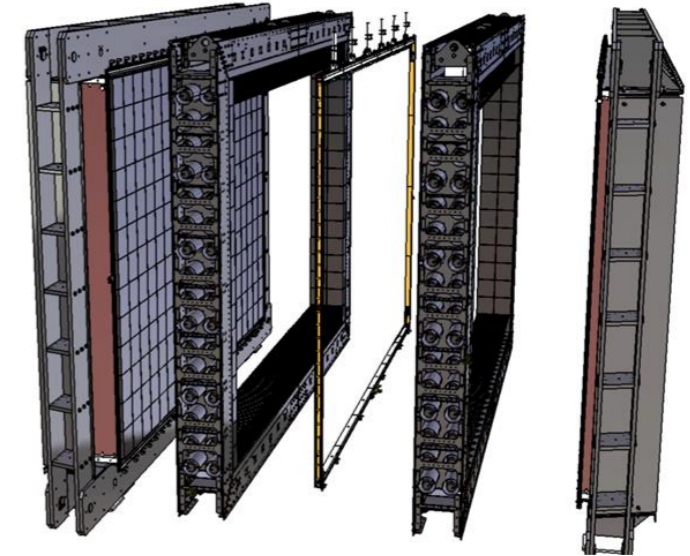
Докладчик: **Шитов Юрий** (ЛЯП, ОИЯИ)



# От NEMO-3 к SuperNEMO: R&D с 2006



$$T_{1/2}^{0\nu}(y) \propto \frac{a\varepsilon}{W} \times \sqrt{\frac{M \times t}{N_{BGR} \times \Delta E}}$$



NEMO-3	⇒	SuperNEMO
$^{100}\text{Mo}$ , 7kg	Isotope, mass	$^{82}\text{Se}$ , 100 kg
$^{208}\text{Tl}$ : < 20 $\mu\text{Bq/kg}$ $^{214}\text{Bi}$ : < 300 $\mu\text{Bq/kg}$	Background in $\beta\beta$ -foil	$^{208}\text{Tl}$ : < 2 $\mu\text{Bq/kg}$ $^{214}\text{Bi}$ : < 10 $\mu\text{Bq/kg}$
8%	Efficiency	30%
8% @ 3 MeV	Energy resolution (FWHM)	4% @ 3 MeV
$T_{1/2} > 2 \times 10^{24}$ y $\langle m_{\nu} \rangle < 0.3 - 0.6$ eV	Sensitivity	$T_{1/2} > 1-2 \times 10^{26}$ y $\langle m_{\nu} \rangle < 40 - 110$ meV

Глобальная задача проекта: экстраполяция успешной треко-калориметрической методики NEMO-3 на новый уровень чувствительности

Calorimeter R&D  
Optical unit



# SuperNEMO

## демонстратор

Source: 7kg of <sup>82</sup>Se

Tracker R&D:  
Wiring robot

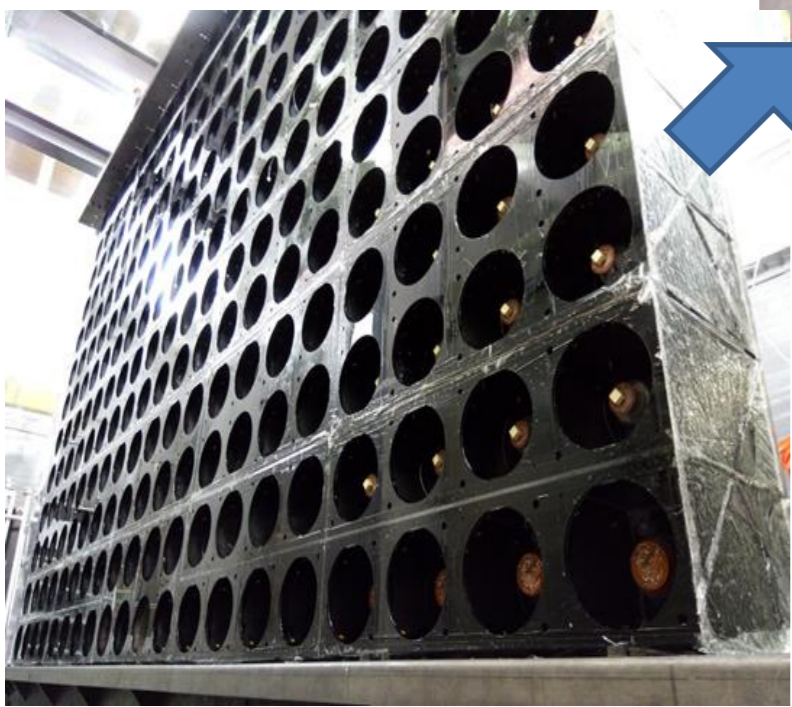


CO: 1 quarter of tracker



Moving CO

Calorimeter wall

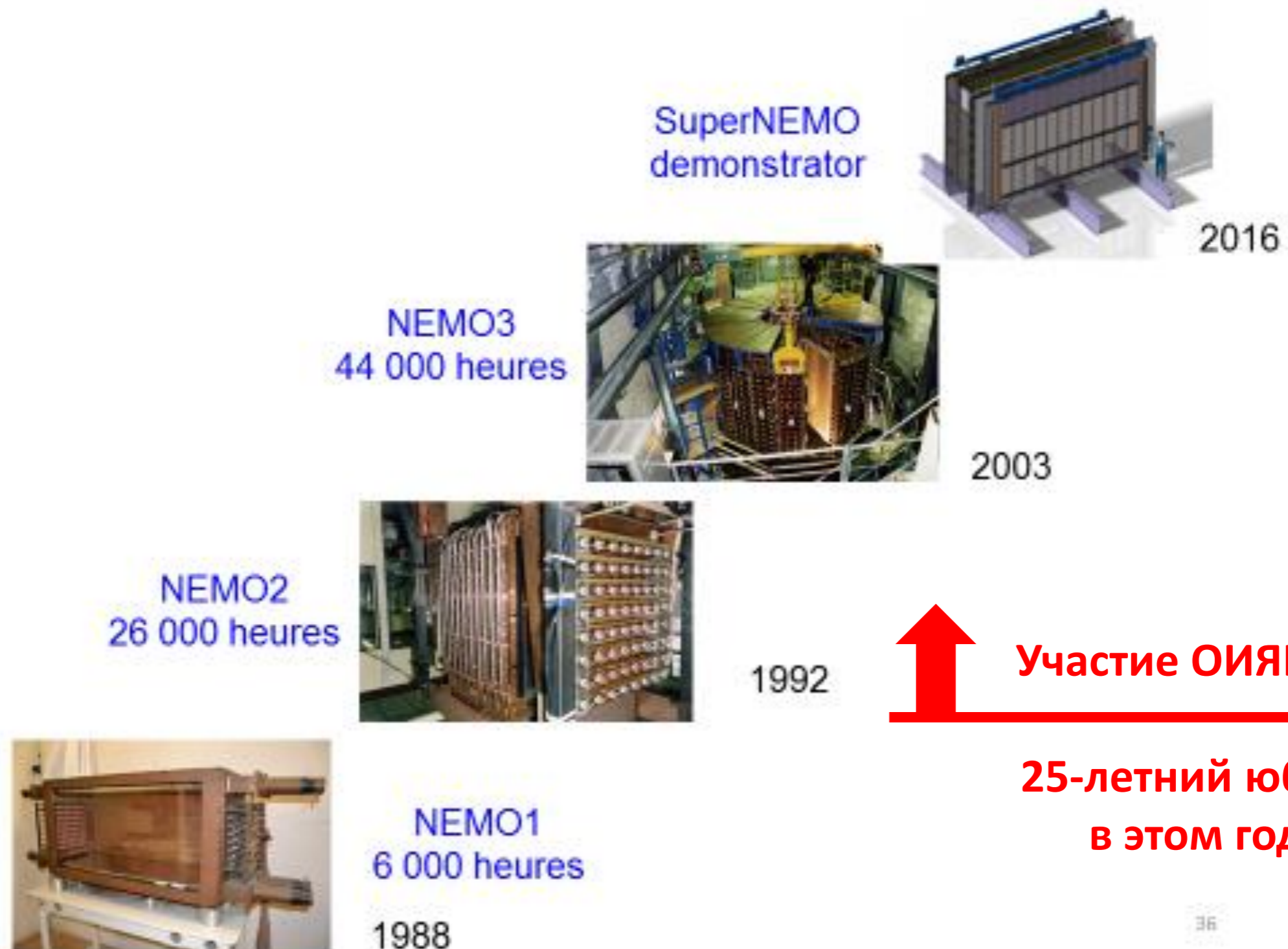


Low background R&D: BiPo-3



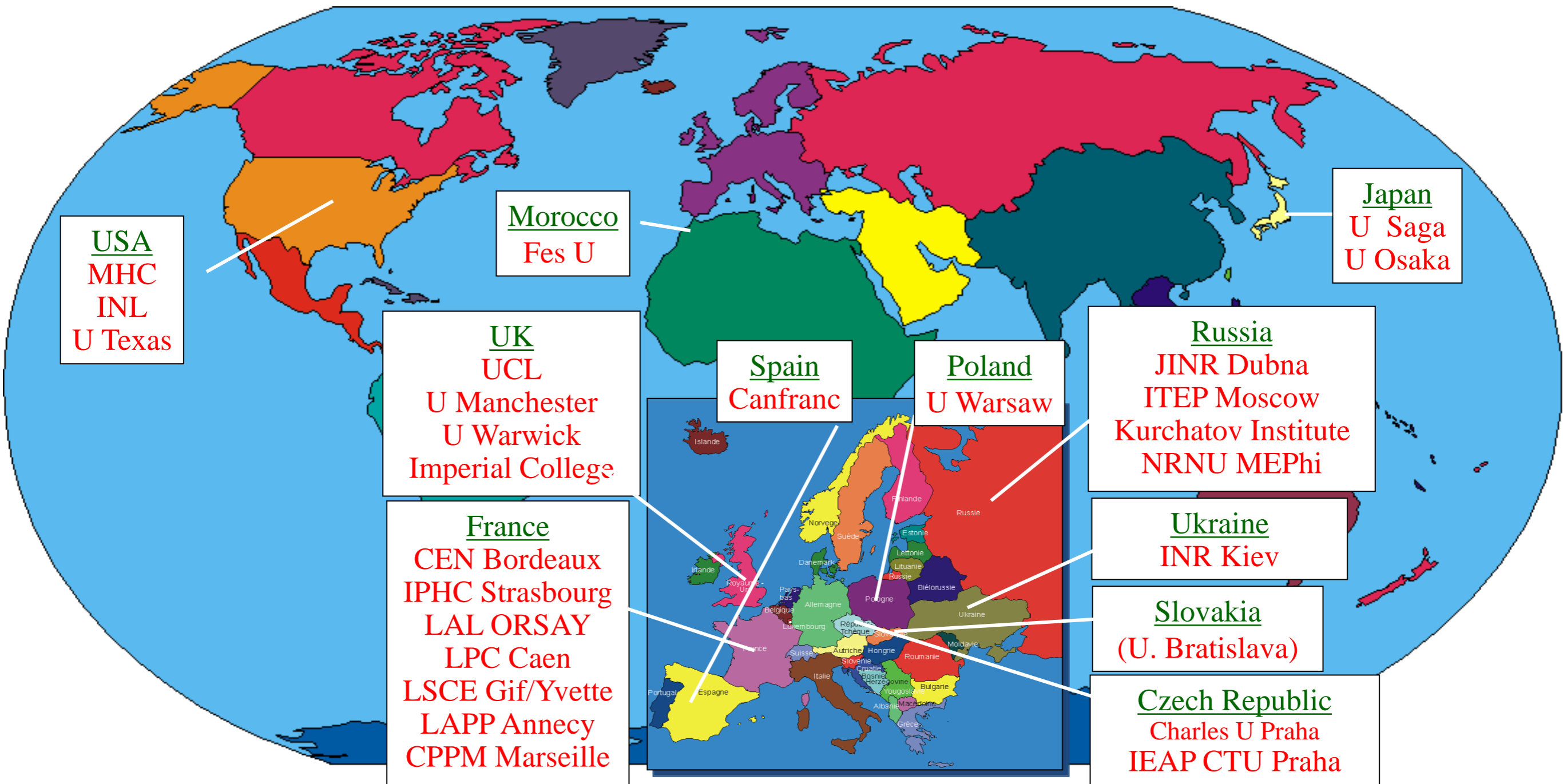
**Текущая задача: запуск SuperNEMO демонстратора, который должен достичь заявленных показателей подавления фона.**

# NEMO/SuperNEMO: этапы пути



# Коллаборации Nemo-3/SuperNemo

Neutrino **E**ttore **M**ajorana **O**bservatory  
(Neutrino **E**xperiment on **M**Olybdenum – historical name)

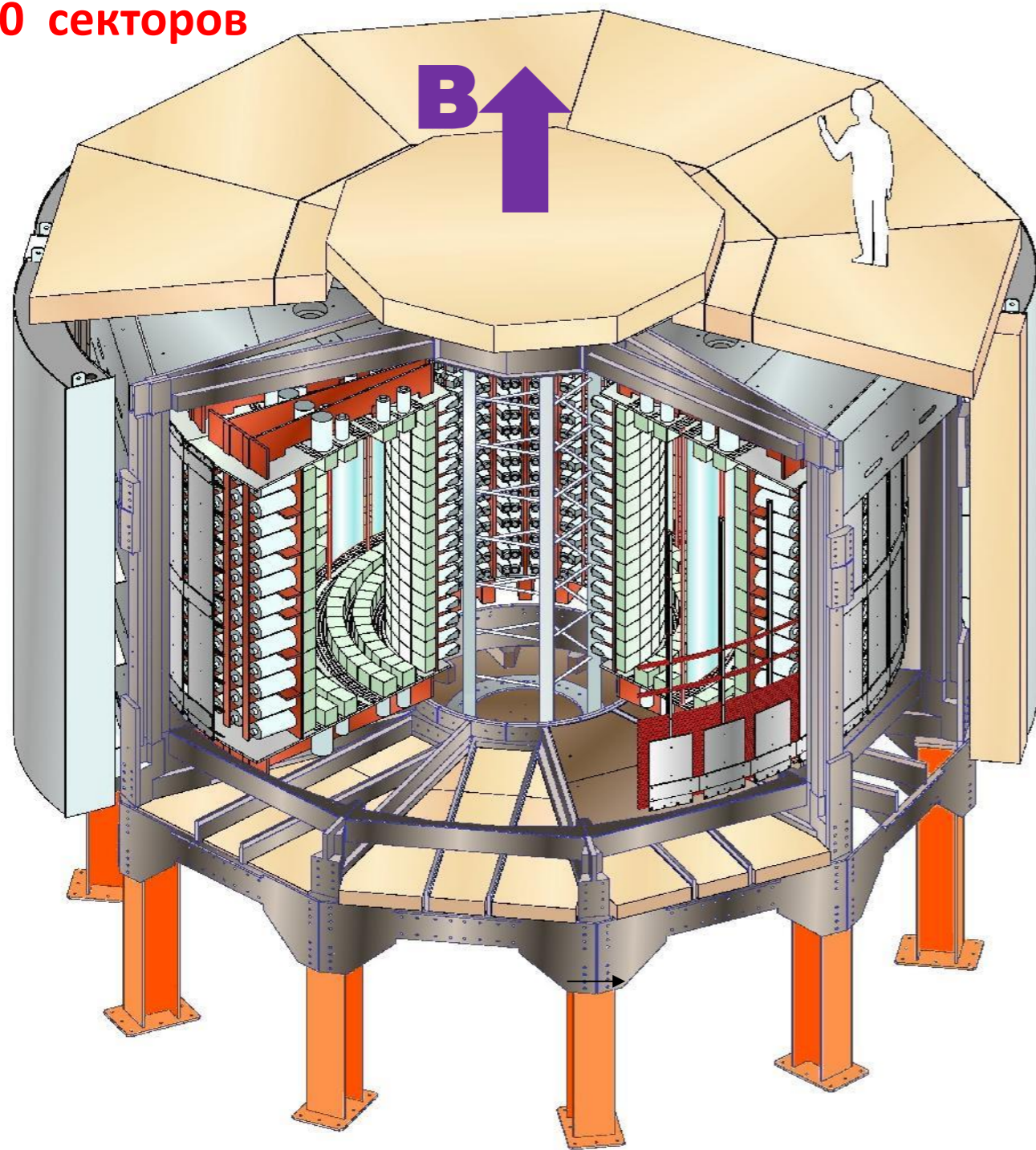


~ 80 physicists, 11 countries, 25 laboratories

# Детектор NEMO-3

Modane (Fréjus) Underground Laboratory (**LSM**) : 4800 m.w.e.

20 секторов



Source: 10 kg of  $\beta\beta$  isotopes  
cylindrical,  $S = 20 \text{ m}^2$ ,  $60 \text{ mg/cm}^2$

Tracking detector:

drift wire chamber operating  
in Geiger mode (6180 cells)

Gas: He + 4% ethyl alcohol + 1% Ar + 0.1% H<sub>2</sub>O

Calorimeter:

1940 plastic scintillators  
coupled to low radioactivity PMTs

Magnetic field: 25 Gauss

Gamma shield: Pure Iron (18 cm)

Neutron shield: borated water (~30 cm) + Wood (Top/Bottom/Gapes between water tanks)

Набор данных: февраль 2003 – январь 2011

Измерялись 7  $\beta\beta$ -изотопов:

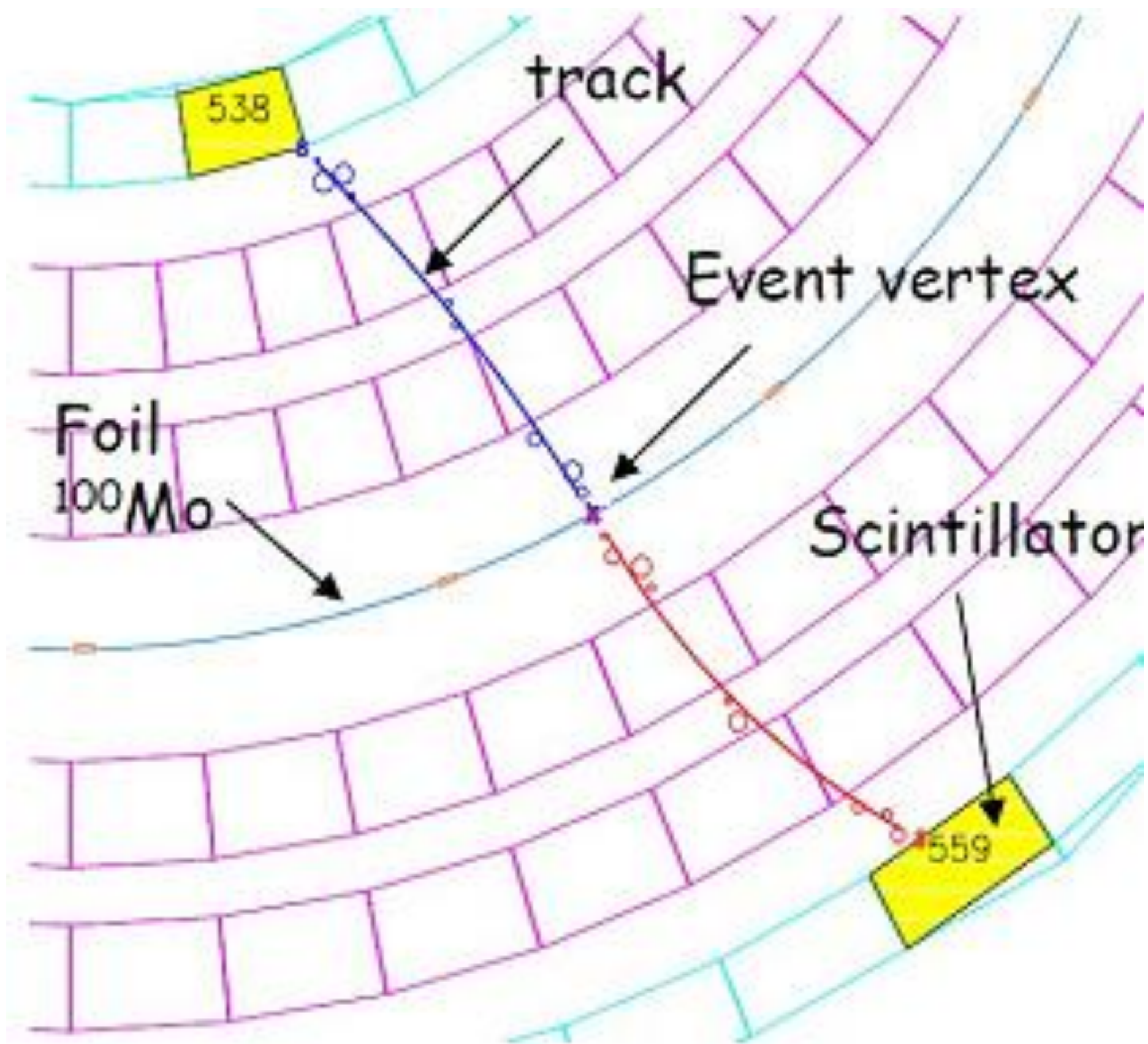
$^{48}\text{Ca}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{116}\text{Cd}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{150}\text{Nd}$

Able to identify  $e^-$ ,  $e^+$ ,  $\gamma$  and  $\alpha$ -delayed



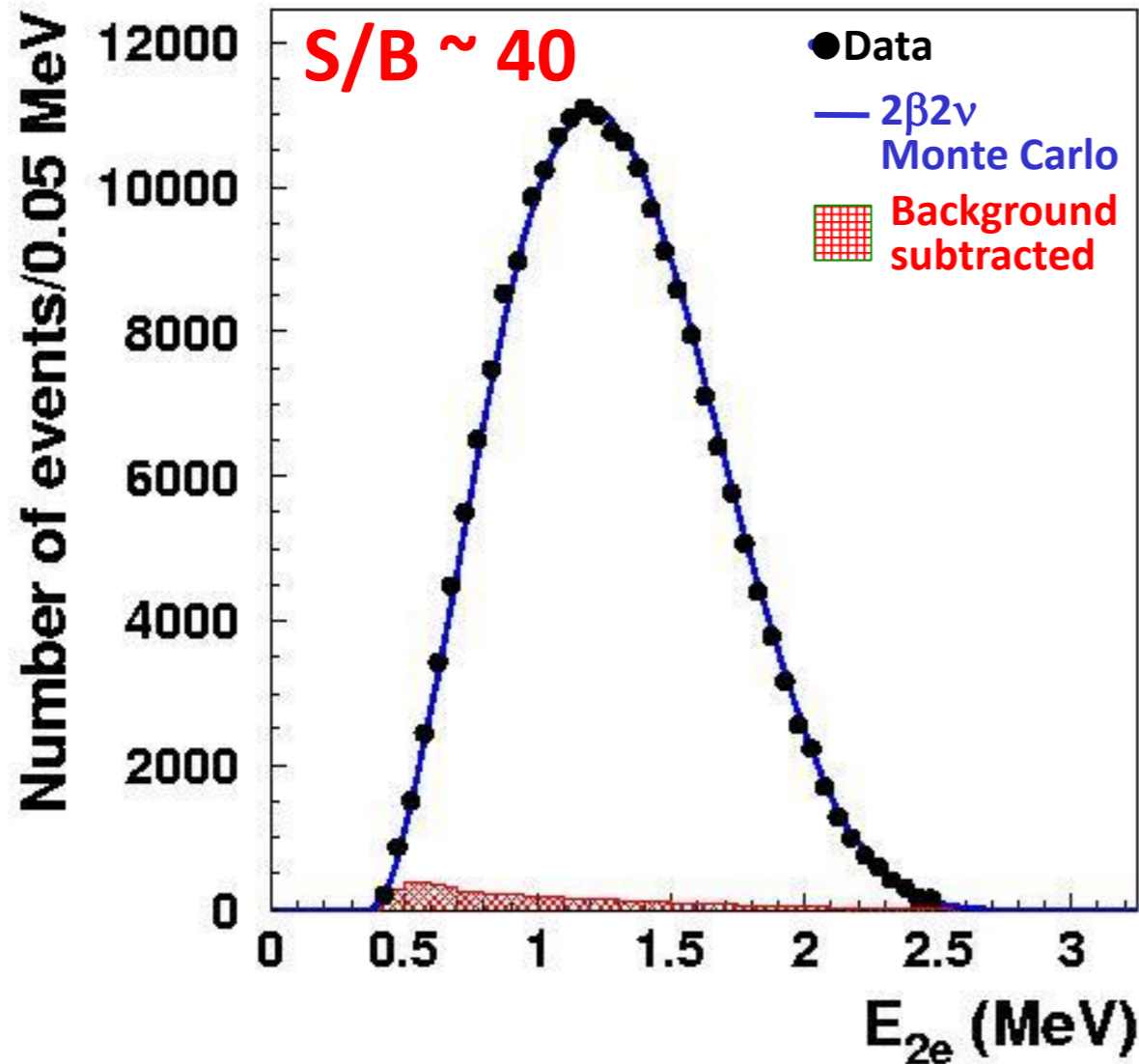
Self-detection of all own background channels

# Событие двойного бета распада в NEMO-3



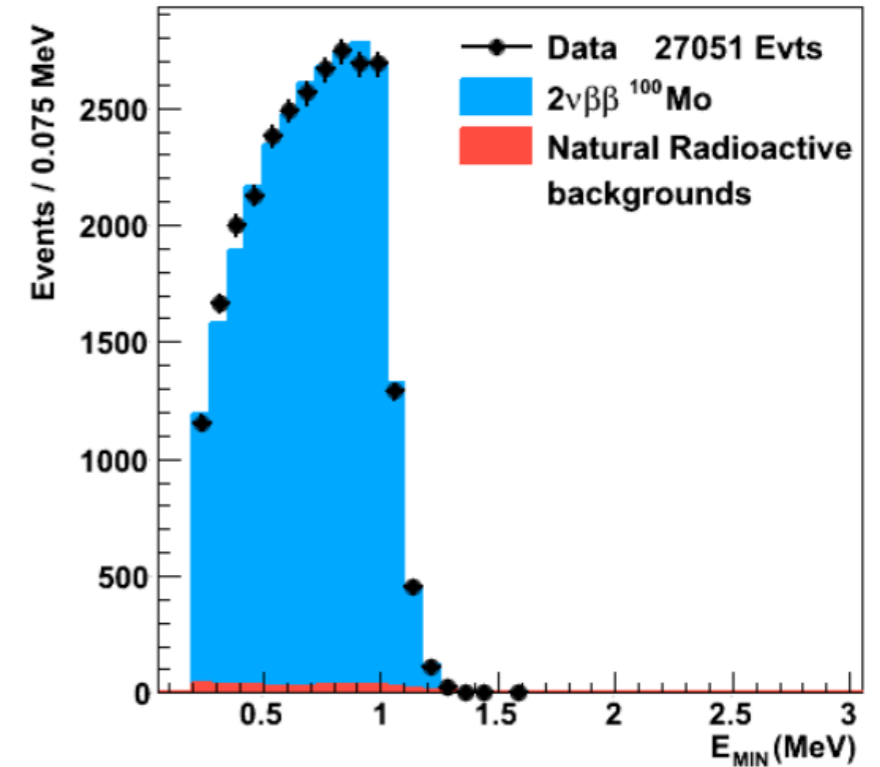
# NEMO-3: $2\nu\beta\beta$ -спектры $^{100}\text{Mo}$

Sum energy spectrum



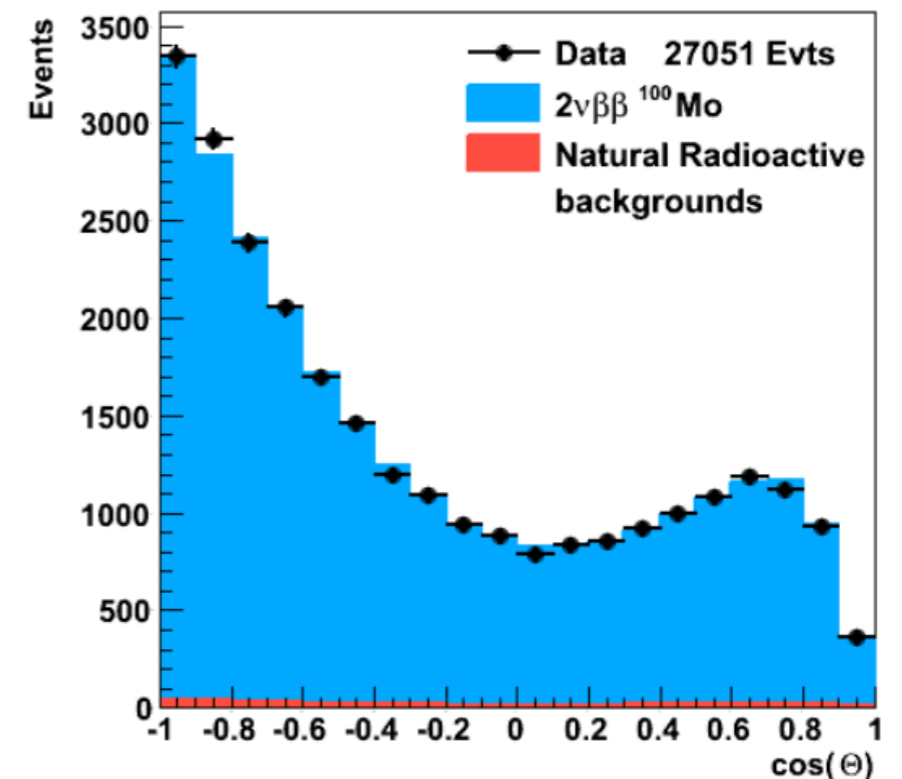
Single electron spectrum

NEMO-3 -  $^{100}\text{Mo}$  - 7 kg, 4.96 y



Angle between electrons

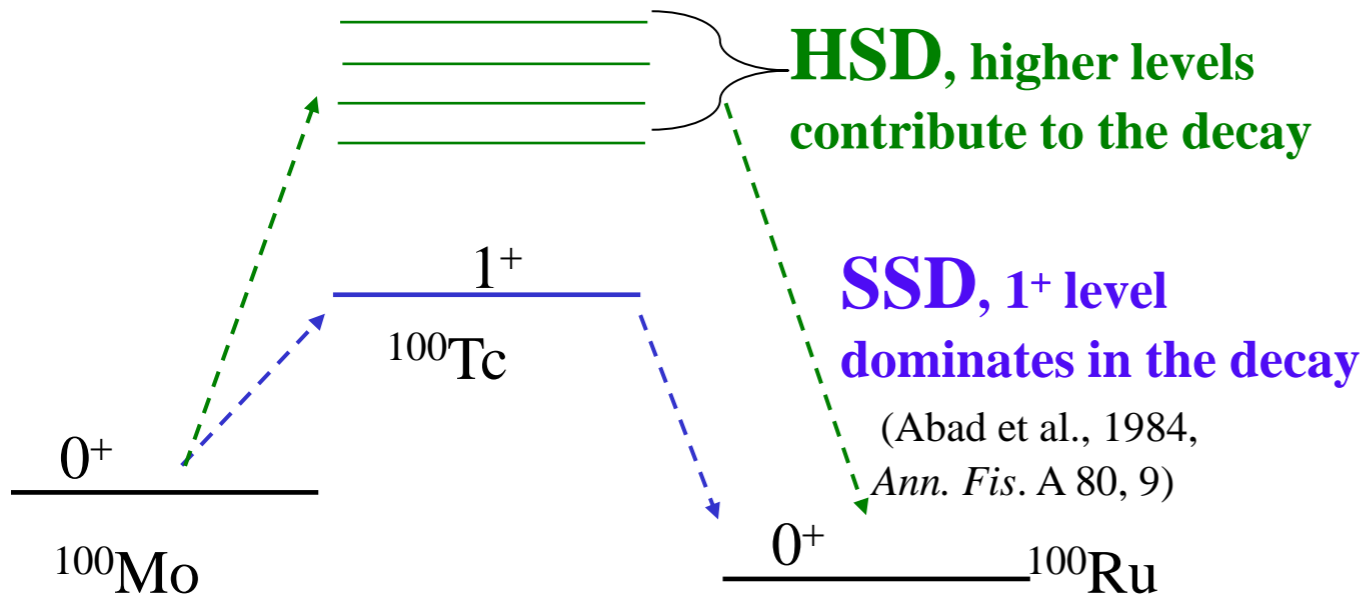
NEMO-3 -  $^{100}\text{Mo}$  - 7 kg, 4.96 y



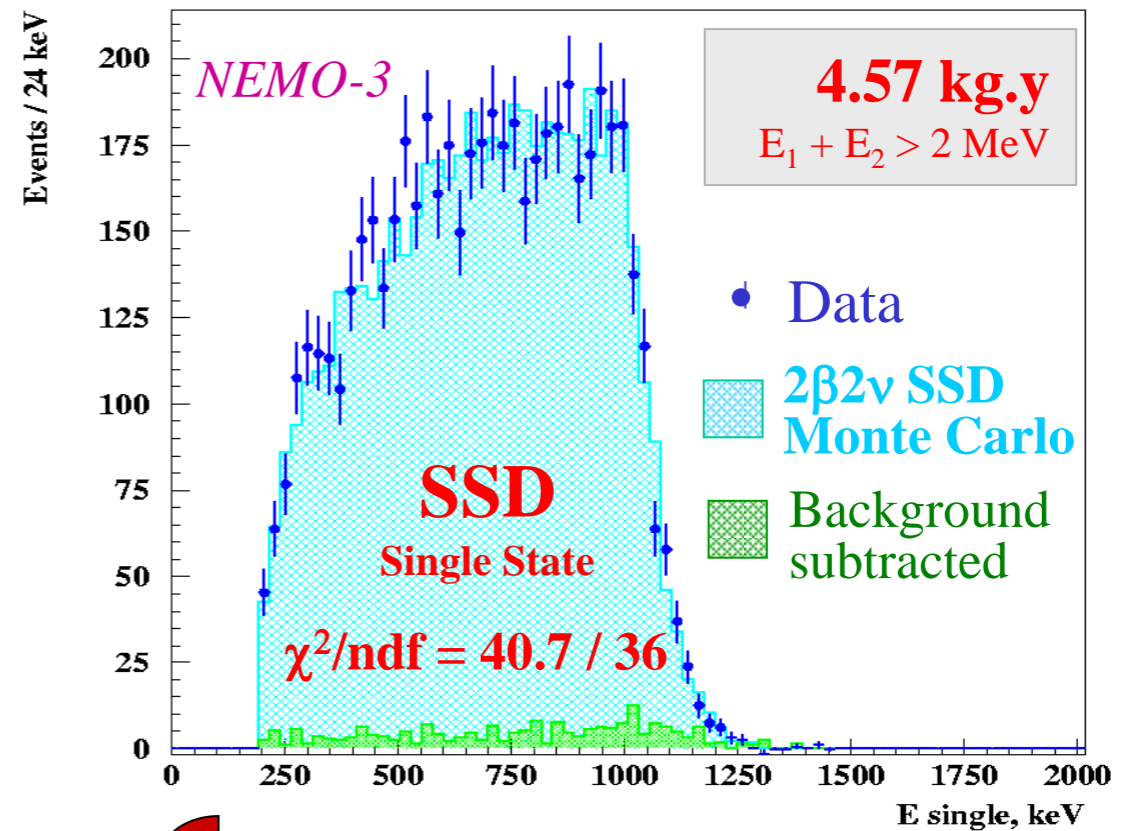
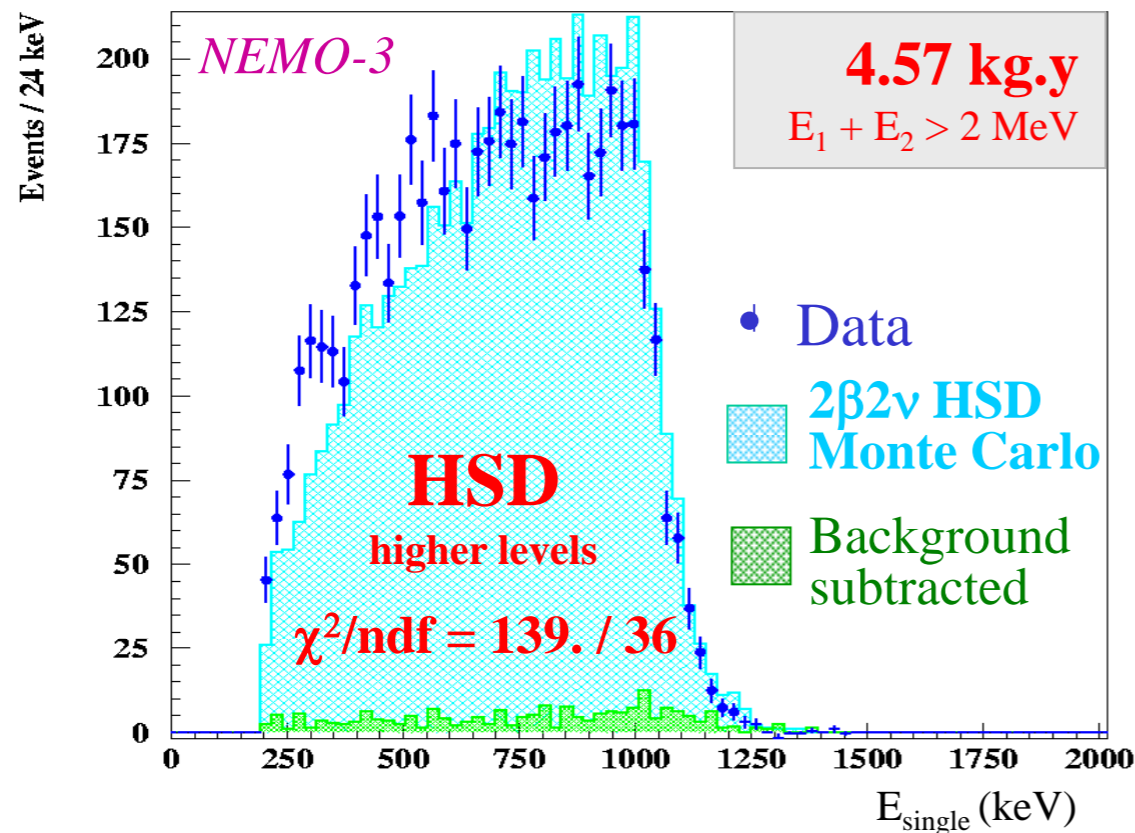
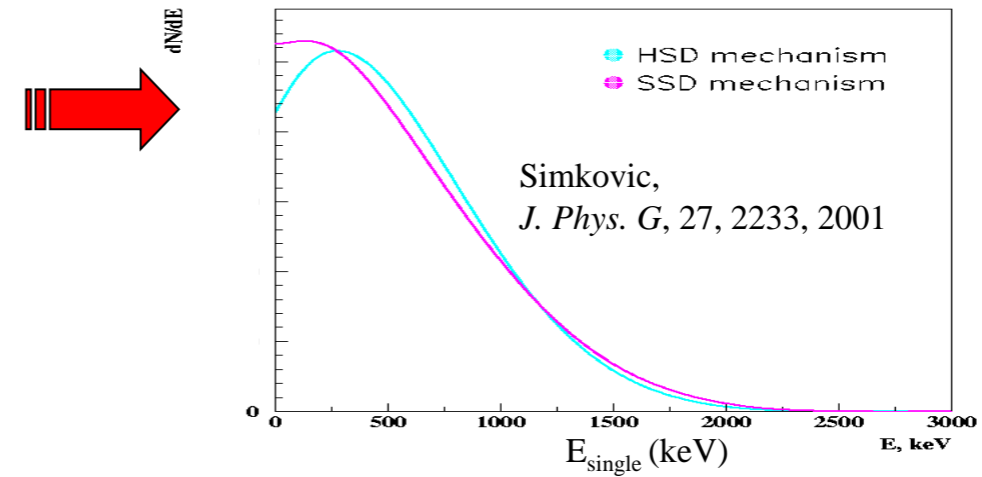
« $\beta\beta$ -фабрика»  
(1  $\beta\beta$ -событие каждые 2.5 минуты)  
Уникальные данные для  
прецизионных исследований



# Определение механизма $2\nu\beta\beta$ -распада в $^{100}\text{Mo}$



*Single electron spectrum different between SSD and HSD*



**HSD:**  $T_{1/2} = 8.61 \pm 0.02$  (stat)  $\pm 0.60$  (syst)  $\times 10^{18}$  y

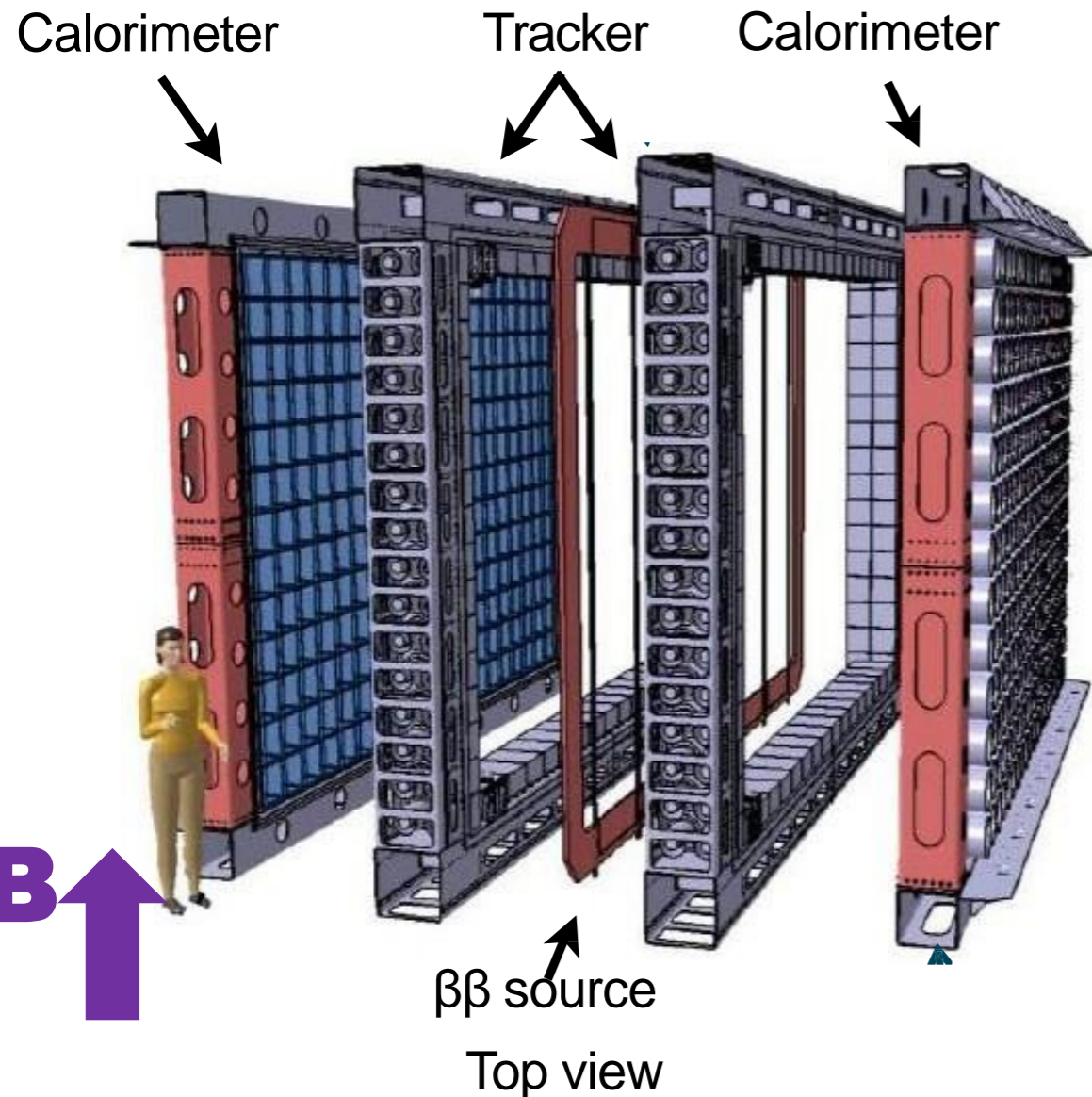
**SSD:**  $T_{1/2} = 7.72 \pm 0.02$  (stat)  $\pm 0.54$  (syst)  $\times 10^{18}$  y

**$^{100}\text{Mo}$   $2\nu\beta\beta$  single energy distribution in favour of Single State Dominant (SSD) decay**

**Методика чувствительна к  $2\nu\beta\beta$ -механизму: первая демонстрация!**

# The SuperNEMO Demonstrator

Modane (Fréjus) Underground Laboratory (**LSM**) : 4800 m.w.e.



**Source:** 7 kg of  $^{82}\text{Se}$ , 36 strips  
planar geometry,  $S \sim 15 \text{ m}^2$ , 40-80  $\text{mg}/\text{cm}^2$

## Tracking detector:

drift wire chamber operating  
in Geiger mode (2034 cells)

Gas: He + 4% ethyl alcohol + 1% Ar + 0.1%  $\text{H}_2\text{O}$

## Calorimeter:

520 plastic scintillators in 2 main walls

+ PMTs: 8" R5912-03 HAMAMATSU

200 PS in side walls (X-walls)

+ PMTs: 5" R6594 HAMAMATSU

**Magnetic field:** 25 Gauss.

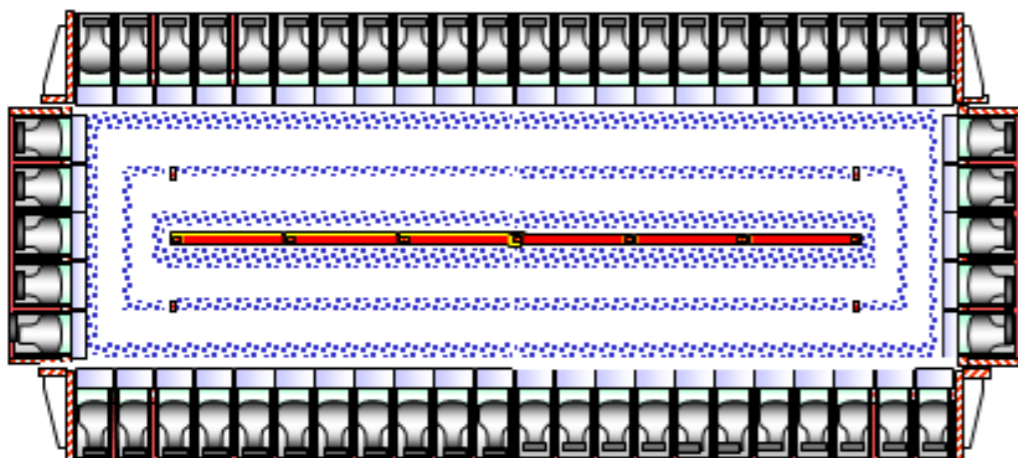
## VETO:

60 plastic scintillators in top/bottom walls

+ PMTs: 5" R6594 HAMAMATSU

## SHIELD:

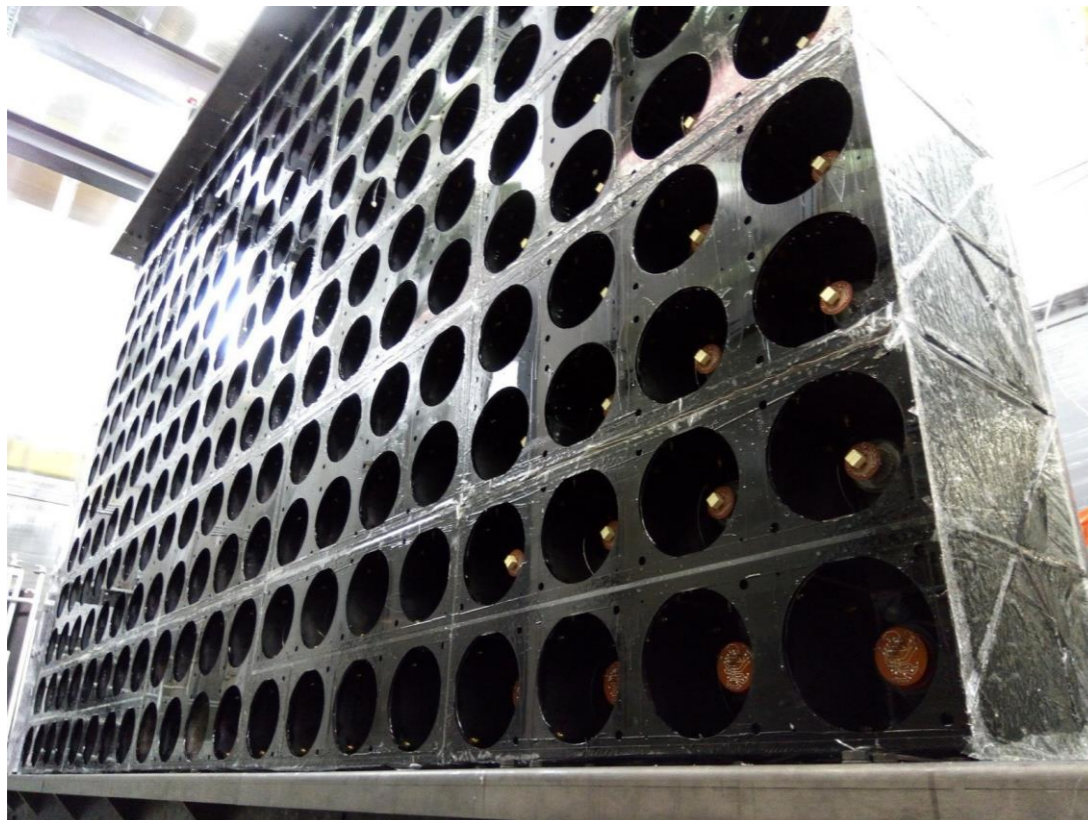
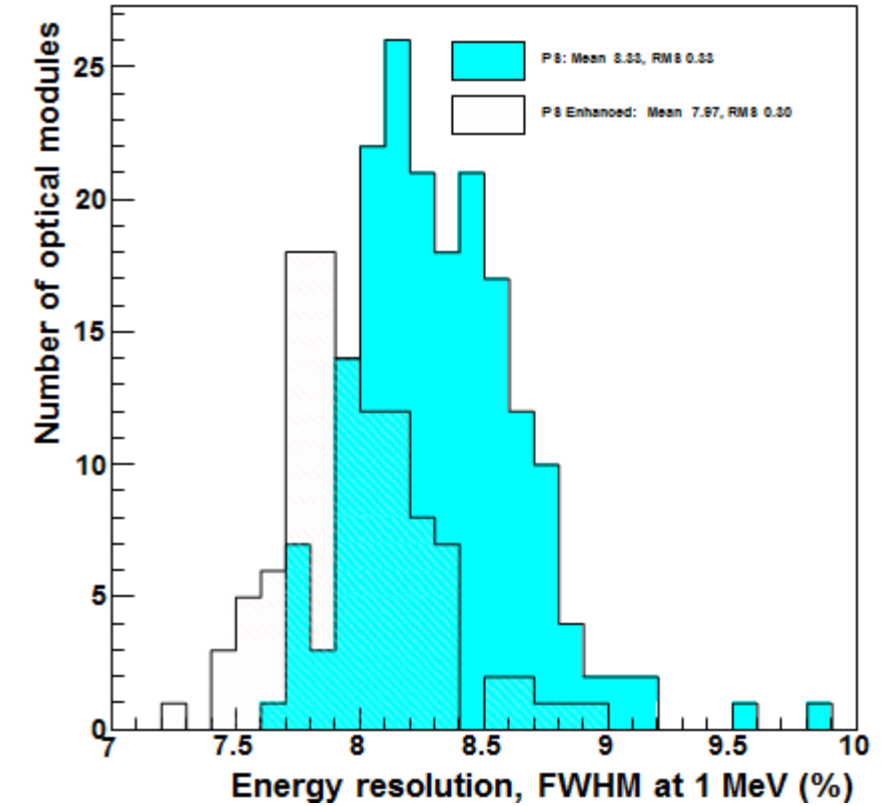
To be built. Planned: 20 cm of iron + 30 cm of borated polyethylene.



# SuperNEMO калориметр

- 520 main optical modules
- 8" high QE radiopure PMTs
- $\sigma_t = 400$  ps at 1 MeV
- Energy resolution  $7.2\%/\sqrt{E(\text{MeV})}$
- Calibration system allows stability to  $< 1\%$

Nucl.Instrum.Meth. under publication (2017)



# SuperNEMO трекер



Nucl.Instrum.Meth. A824 (2016)

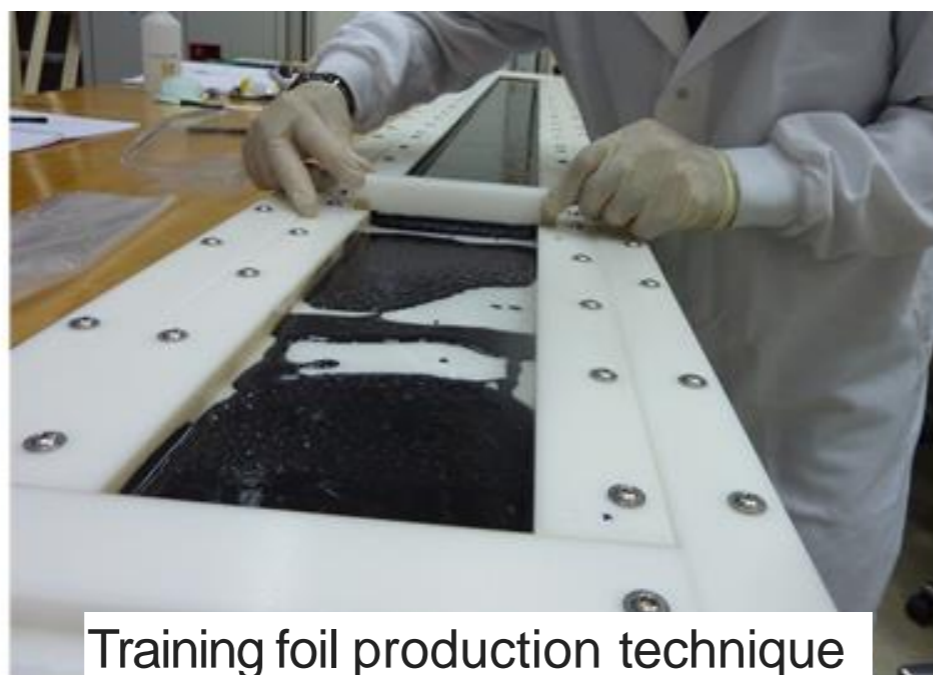
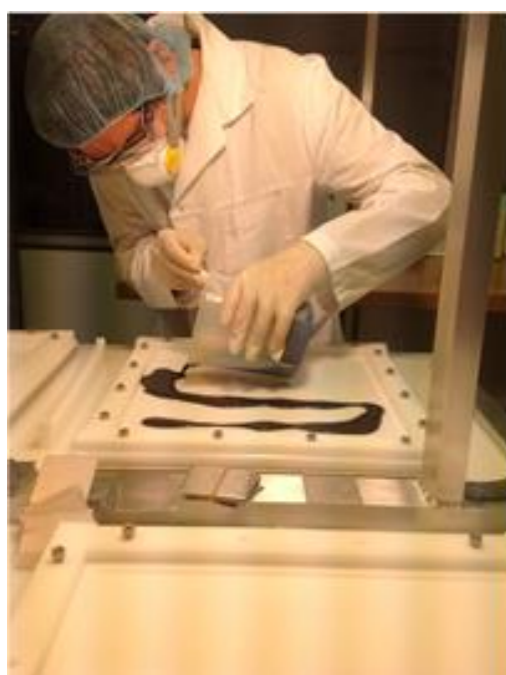
- Multi-wire drift chamber in Geiger mode
- Ultrapure materials: copper, steel, duracon .
- Robotic production of 2034 drift cells
- Radiopure gas flow, anti-radon sealing
- <1% dead channels



# SuperNEMO: фольги-источники

- 36 foils made of  $^{82}\text{Se}$  powder mixed with PVA glue + mylar mechanical support (200  $\mu\text{m}$  thick)
- 7 kg of  $^{82}\text{Se}$  ( $Q_{\beta\beta}=2.996$  MeV)
- Target limits (challenging) on foil contamination:
  - $^{208}\text{Tl} \leq 2 \mu\text{Bq/kg}$
  - $^{214}\text{Bi} \leq 10 \mu\text{Bq/kg}$
- BiPo detector in Canfranc laboratory to measure source foil contamination: preliminary results indicate levels of  $^{208}\text{Tl}$  [10-30]  $\mu\text{Bq/kg}$  (90% C.L.)

JINST 12 (2017) no.06



Training foil production technique



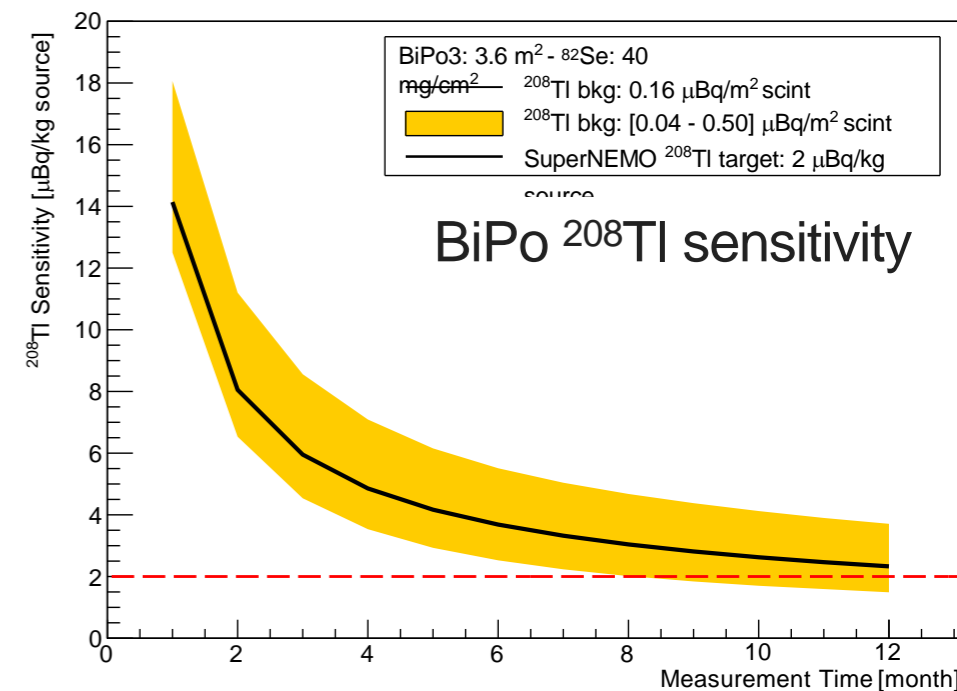
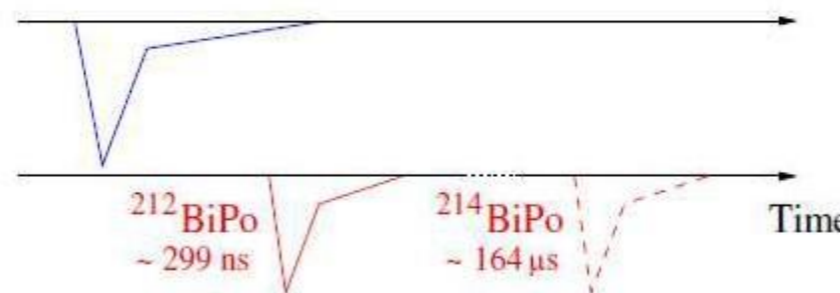
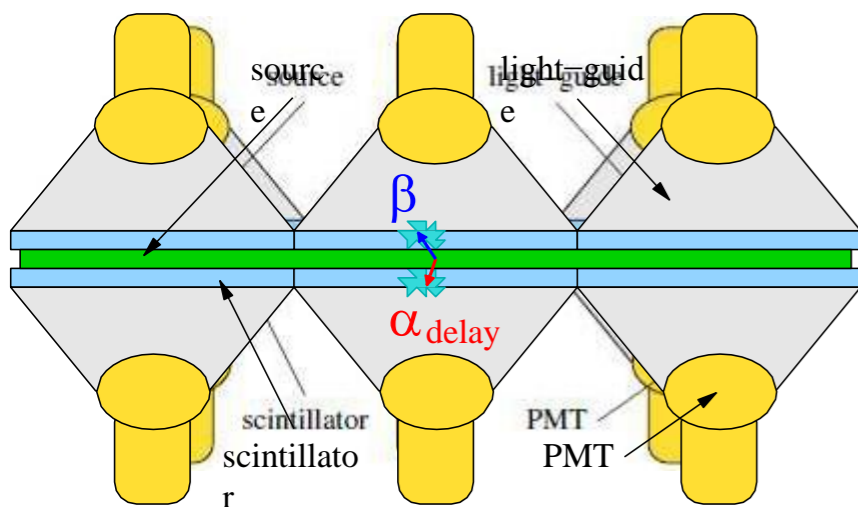
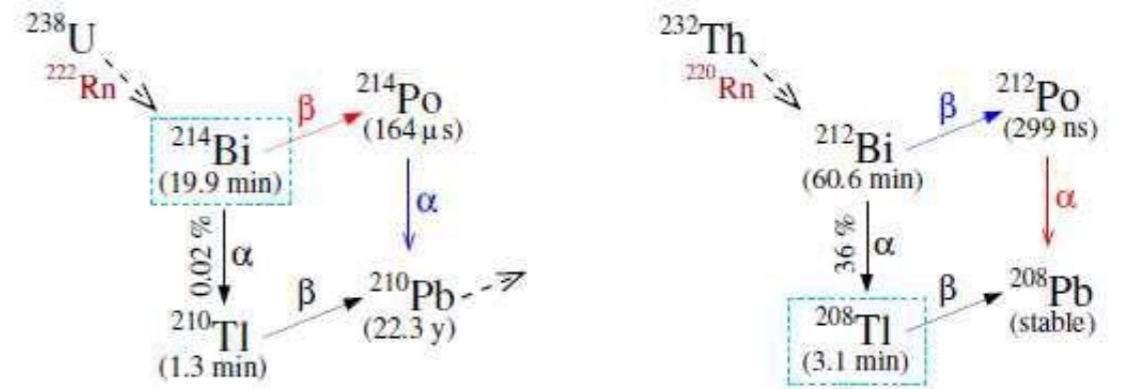
$^{82}\text{Se}$  foils radio-purity measurements

BiPo 3



# Детектор Bi-Po 3

- HPGe spectroscopy not sensitive enough to reach few  $\mu\text{Bq}/\text{Kg}$ : BiPo-3 dedicated setup at Canfranc underground lab
- 2 modules of  $3.0 \times 0.6 \text{ m}^2$  can measure up to 1.4 kg of  $^{82}\text{Se}$  foil with thickness of  $40 \text{ mg}/\text{cm}^2$
- $^{214}\text{Bi}$  and  $^{208}\text{Tl}$  measured through process from natural radioactivity chain
- Thin radiopure plastic scintillators coupled to lightguides and low radioactivity PTMs



# Борьба с радоном

**Diffusion!**  
**Emanation!**



Vacuum Pump

Carbon Trap

Radon Detector  
(Electrostatic & Pin Diode)

Radon line to work with tracker



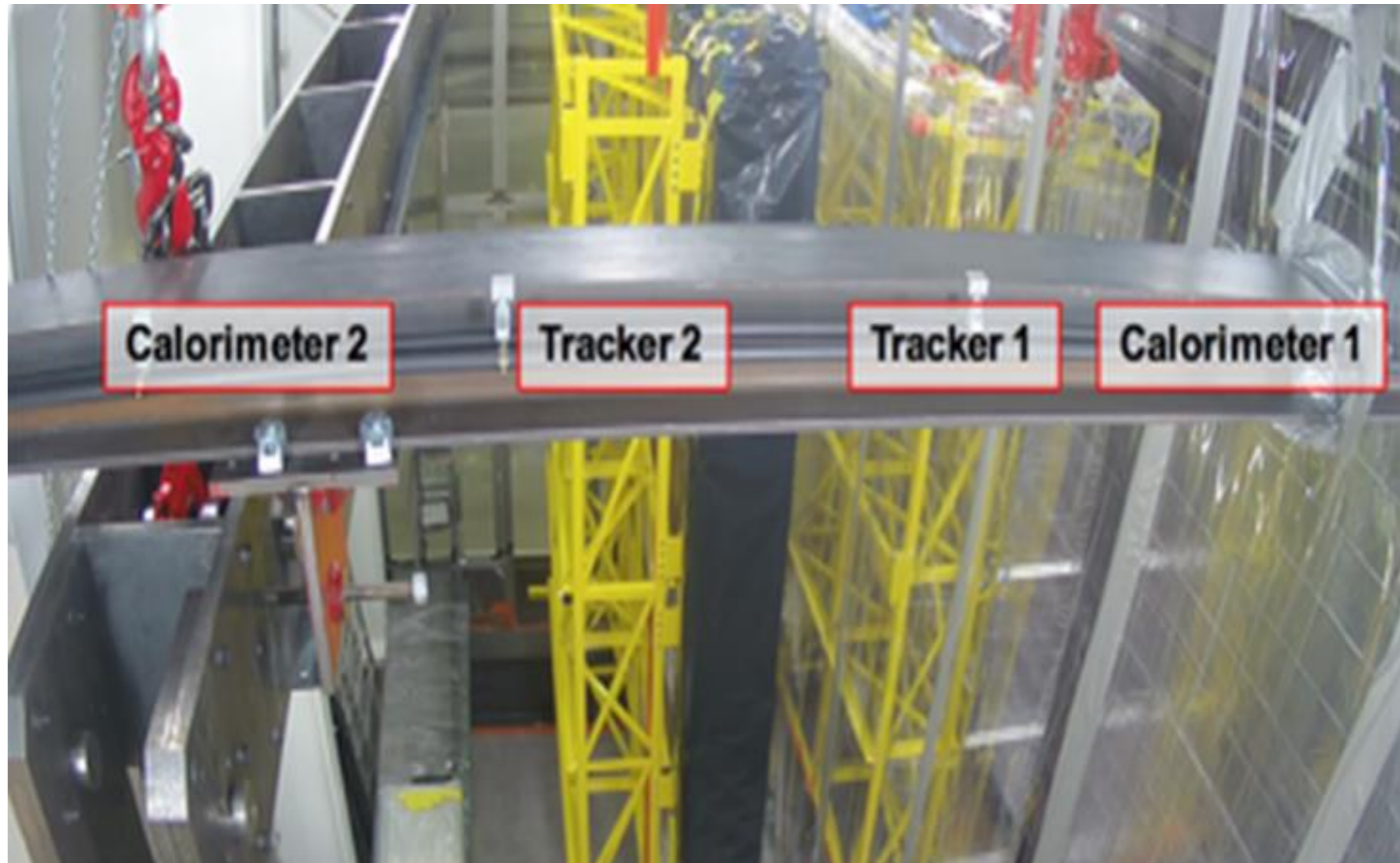
Radon emanation setup.



Tracker module under Rd measurement

**Очень трудо- и время-затратная работа: 10 дней на одно базовое измерение.**  
**SuperNEMO коллаборация обладает уникальным опытом и базой данных по радоновым измерениям для различных материалов.**

# Статус установки



SuperNEMO Демонстратор практически полностью смонтирован в LSM (за исключением нескольких фольг источников и калибровочной системы).  
Закрытие и запуск в полном объеме запланировано на весну 2018 года.



# Вклад ОИЯИ в Демонстратор

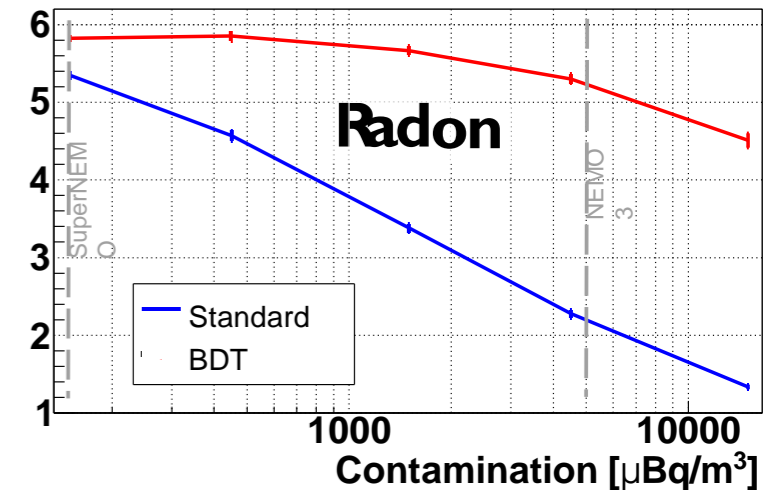
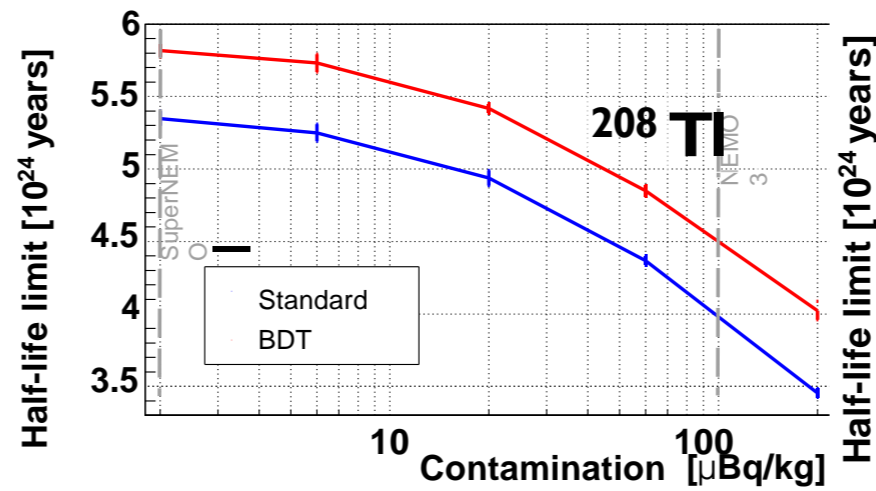
- Изготовление 720 блоков пластиковых сцинтилляторов для калориметра Демонстратора (в сотрудничестве с Пражским университетом).
- Изготовление 60 оптических модулей для системы ВЕТО (сцинтиллятор + ФЭУ 5" R6594 HAMAMATSU).
- Приобретение 100 ФЭУ 8" R5912-03 HAMAMATSU для калориметра.
- Приобретение 7 крейтов для электроники калориметра.
- Покупка 1.5 кг обогащенного  $^{82}\text{Se}$  для создания источников.
- Разработана и реализована уникальная методика очистки  $^{82}\text{Se}$ . Оборудована чистая комната и очищено 3.5 кг селена, использовавшегося для создания источников Демонстратора.
- Изготовление сигнальных и HV-кабелей для трекера.
- Приобретение, создание и обслуживание оборудования для низкофоновых измерений: германиевые, радоновые, нейтронные детекторы в LSM.
- Участие в разработке программного обеспечения, симуляциях.

# Чистая комната для очистки $^{82}\text{Se}$ (ЛЯП ОИЯИ)



# Ожидаемые результаты

	SuperNEMO	Status
isotope	$^{82}\text{Se}$ (or other, e.g. $^{150}\text{Nd}$ )	$^{82}\text{Se}$
isotope mass	7 -+ 100 kg	7 kg
radon	0.15 mBq/m <sup>3</sup>	in progress
internal contamination	$^{208}\text{Tl} \leq 2 \mu\text{Bq/kg}$ $^{214}\text{Bi} \leq 10 \mu\text{Bq/kg}$	in progress
FWHM	8% @ 1 MeV	ok



In [2.8-3.2] MeV:

- Efficiency: 27.5%
- Total number of bkg events: 0.21
- Background index:  $3 \times 10^{-5}$  cts/(keV kg yr)

## 1 module

Demonstrator Module

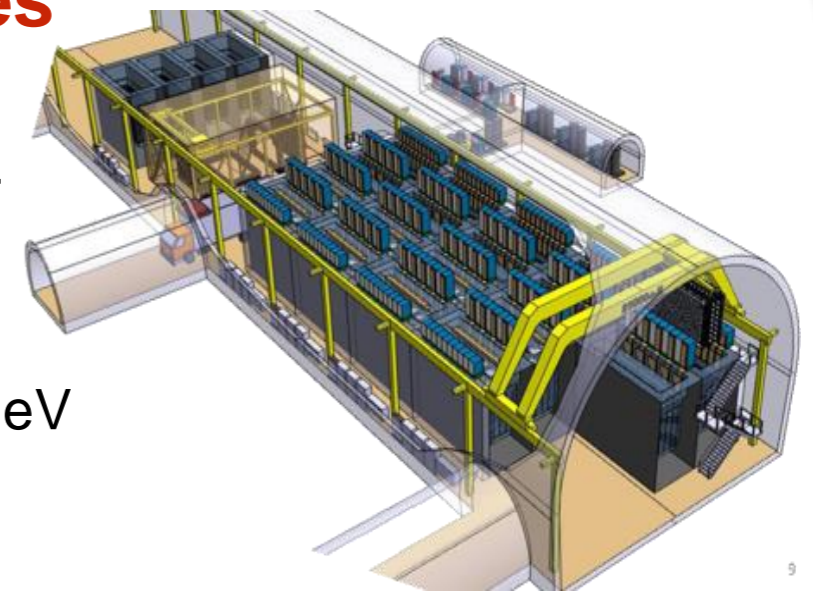
17.5 kg.yr :  
 $T_{1/2}^0 > 6 \times 10^{24}$  yr  
 $m_i < 0.20 - 0.55$  eV



## 20 modules

Full SuperNEMO

500 kg.yr :  
 $T_{1/2}^0 > 10^{26}$  yr  
 $m < 40 - 110$  meV



# План работ

- Весна 2018 – завершение сборки и запуск Демонстратора без нейтронной защиты.
- Лето 2018 года – калибровка Демонстратора, запуск накопления данных в конфигурации без нейтронной защиты
- Первая половина 2019 года – создание нейтронной защиты Демонстратора.
- Вторая половина 2019 года – калибровка и запуск накопления данных в полной конфигурации Демонстратора.
- 2020-2021 год – накопление данных, анализ данных, оценка фонов, борьба с фонами, если потребуется, публикация результатов.
- В течении всего срока – продолжение программы R&D по методикам обогащения других изотопов:  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ . Совершенствование методики очистки  $^{82}\text{Se}$ . Совершенствование методики производства пластических сцинтилляторов.

# Выводы

- В основе экспериментов NEMO/SuperNEMO лежит уникальная треко-калориметрическая методика для исследования  $\beta\beta$ -процессов, успешно разрабатываемая в течении десятков лет. Она позволяет восстанавливать полную картину (паттерн)  $\beta\beta$ -распада и тестировать его механизм.
- R&D проекта SuperNEMO ведутся с 2006 года, в результате чего был разработан Демонстратор (первый модуль) SuperNEMO. Его основная задача - демонстрация работоспособности методики в отношении подавления фонов (внутри фольг-источников и радон), а также физические измерения. На 7 кг  $^{82}\text{Se}$  в течении 2.5 лет планируется достичь чувствительность к эффективной массе нейтрино 0.20 - 0.55 эВ.
- Демонстратор практически полностью смонтирован в LSM, его запуск запланирован на весну 2018 года.
- Создание Демонстратора стало возможно при решающем (критическом) вкладе ОИЯИ в целый ряд систем: калориметр, трекер, источники
- На данном этапе выполнения проекта (фаза накопления данных) требуемые затраты невелики при гарантированной выгоде – участии в публикациях.
- В случае успешной работы Демонстратора открывается возможность для полномасштабного проекта: измерение 100 кг источника в 20 модулях при чувствительности 50-100 мэВ к эффективной майорановской массе нейтрино

# План-график и необходимые ресурсы (форма №26)

Наименование узлов и систем установки, ресурсов, источников финансирования		Стоимость узлов (тыс.\$) установки. Потребности в ресурсах	Предложения Лабораторий по распределению финансирования и ресурсов			
			1 год	2 год	3 год	
Основные узлы и оборудование	1. Материалы для калориметра (стирол, алюминий, p-терфенил, POPOP		24	8	8	8
	2. Спектроскопическая электроника для стендов-тестирования пластмассовых сцинтилляторов и ФЭУ		10	10	0	0
	3. Борированный полистирол для создания нейтронной защиты Демонстратора		40	30	10	0
	4. Материалы и оборудование для поддержания работоспособности детекторов, находящихся под нашим управлением в Демонстраторе SuperNEMO ( 2 радоновых детектора, HPGe спектрометр) и проведения калибровок, включая создание калибровочных источников. Радиохимическое оборудование.		45	15	15	15
	<b>Итого</b>		<b>119</b>	<b>63</b>	<b>33</b>	<b>23</b>
Необходимые ресурсы	Нормо- часы	ОП ОИЯИ	0	0	0	0
		ООЭП ЛЯП	1800	600	600	600
Источники финансирования	Бюд жет	Затраты из бюджета	<b>119</b>	<b>63</b>	<b>33</b>	<b>23</b>
	Внебюджетн ые средства	<i>Средства по грантам. Другие источники финансирования (получение данных средства в настоящее время не гарантировано)</i>	30	10	10	10

# Смета затрат (форма №29)

№№ пп	Наименование статей затрат	Полная стоимость	1 год	2 год	3 год
Прямые затраты на Проект					
1.	Компьютерная связь	6.0K US\$	2.0	2.0	2.0
2.	ООЭП ЛЯП	1800 норм ч.	600	600	600
3.	ОП ОИЯИ	0 норма ч.	0	0	0
4.	Материалы	64.0K US\$	38.0	18.0	8.0
5.	Оборудование	55.0K US\$	25.0	15.0	15.0
6.	Взнос в коллаборацию	60.0K US\$	20.0	20.0	20.0
7.	Командировочные расходы	60.0K US\$	30.0	15.0	15.0

**Итого по прямым расходам**

**245.0K US\$**

**115.0K US\$**

**70.0K US\$**

**60.0K US\$**

# Публикации по SuperNEMO в 2016-2018 гг.

1. R. Arnold, O. Kochetov et.al., “Measurement of the double beta-decay half-life and search for the neutrinoless double beta-decay of Ca-48 with NEMO-3 detector”, Phys. Rev. D93 (2016) 112008-1 – 112008-9.
2. R. Arnold, O. Kochetov et.al., “Measurement of the double beta-decay half-life and search for the neutrinoless double beta-decay of Cd-116 with the NEMO-3 detector”,  
3. arXiv: 1610.03226v2[hep-ex], Phys. Rev. D95 (2017) 012007-1 – 012007-12.
4. R. Arnold, O. Kochetov et.al., “Measurement of the double beta-decay half-life of Nd-150 and a search for neutrinoless double beta-decay processes with the full exposure from the NEMO-3 detector”, Phys. Rev. D94 (2016) 072003.
5. S. Blot from NEMO-3&SuperNEMO Collaborations, “Investigating bb decay with NEMO-3 and SuperNEMO experiments”, Journal of Physics: Conference Series 718 (2016).
6. H. Gomes from NEMO-3&SuperNEMO Collaborations, “Latest results of NEMO-3 experiment and present status of SuperNEMO”, Nuclear and Particle Physics Proceedings (2016) 1765-1770.
7. P.Povinec SuperNEMO Collaboration, “SuperNEMO – a new generation of underground experiments for double beta-decay investigations”, The 14<sup>th</sup> Vienna Conference on Instrumentation 15-16 Feb., 2016.
8. A.S. Barabash, O. Kochetov et. al., “Calorimeter development for the SuperNEMO double beta-decay experiment”, NIM A868 (2017) 98-108.
9. R. Arnold, O. Kochetov et al. from NEMO-3 Collaboration, “Search for neutrinoless quadrupole-b decay of the Nd-150 with the NEMO-3 detector” Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 041801.
10. A.S. Barabash, O. Kochetov et al., “The BiPo-3 detector for the measurement of ultra low natural radioactivities of thin materials” JINST 12 (2017) P06002.
11. P. Loazia, O.Kochetov et al., “The BiPo-3 detector”, Applied Radiation and Isotopes 123 (2017) 54-59.



# Участники проекта

<b>N</b>	<b>Person</b>	<b>Status</b>	<b>Subjects</b>	<b>FTE</b>
1	O.I Kochetov	Project Leader	calorimeter	0.9
2	Yu.A.Shitov	Deputy Leader	software, data analysis	0.5
3	V.B.Brudanin	Participant	calorimeter	
4	V.G.Egorov	Participant	calorimeter, data analysis	
5	3. A.A. Smolnikov	Participant	calorimeter, data analysis	0.3
6	4. A.A. Klimenko	Participant	software, data analysis	0.35
7	5. V.I. Tretyak	Participant	software, data analysis	0.9
8	7. D.V. Karaivanov	Participant	radiochemistry, Se-82 purification, sources	0.35
9	8. A.V. Rahimov	Participant	radiochemistry, Se-82 purification, sources	0.35
10	9. D.V. Filosofov	Participant	radiochemistry, Se-82 purification, sources	0.3
11	10. N.A. Mirzaev	Participant	radiochemistry, Se-82 purification, sources	0.4
12	11. Yu.V. Yushkevich	Participant	electromagnetic mass separation, calibration	0.25
13	12. A.V. Salamatin	Participant	electronics, cables	0.3
14	13. V.V. Timkin	Participant	calorimeter, VETO system and cables	0.9
15	14. I.B. Nemchenok	Participant	PS production, calorimeter and VETO system	0.2
16	15. I.I. Kamnev	Participant	PS production, calorimeter and VETO system	0.3
17	16. O.I. Vagina	Participant	PS production, calorimeter and VETO system	0.3
<b>In total</b>				<b>5.2</b>

Backup slides

# Calorimetry vs. tracko-calo

Calorimetric

Tracko-calo

## Experimental advantages

- **Larger mass**
- **Better resolution**
- **high (~ 100%) efficiency**

- **Real  $\beta\beta$ -observation.**
- **Any  $\beta\beta$ -source can be measured**
- **Potentially zero-background exp.**
- **Test of different  $\beta\beta 0\nu$  mechanisms in the case of observation**

## Experimental drawbacks

**We don't see electrons, just energy released - no absolute proof, that we see  $\beta\beta 0\nu$ -peak and not something else ( $\gamma$ -line)!**

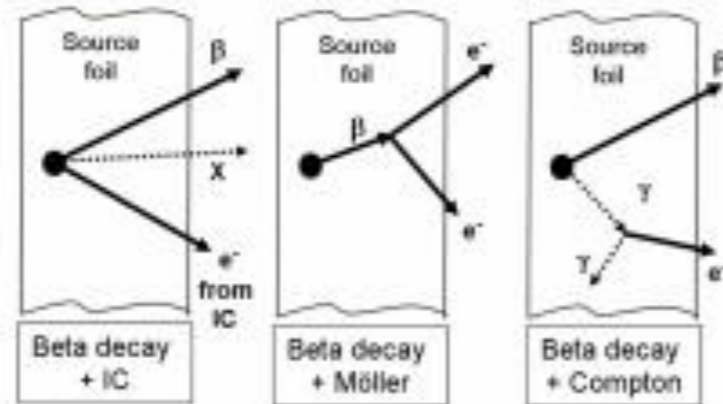
- **difficult to accept large mass**
- **smaller efficiency**
- **worth resolution**

# Фоны SuperNEMO

- Internal backgrounds

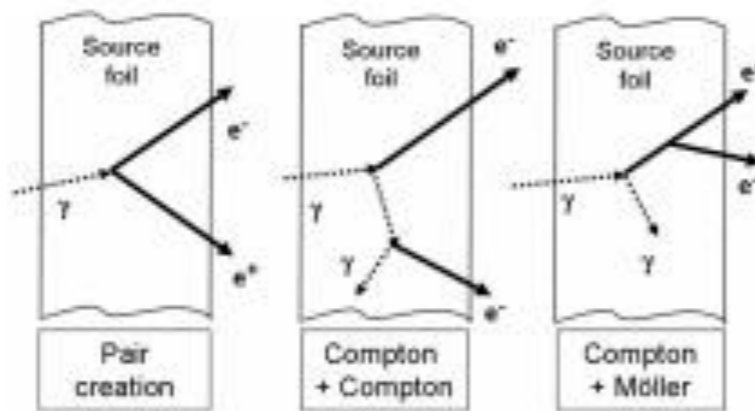
$2\nu\beta\beta$  tail and radio-impurities inside the source foil

$^{208}\text{Tl}$  (from  $^{232}\text{Th}$ ),  $^{214}\text{Bi}$  (from  $^{238}\text{U}$ )



- External backgrounds

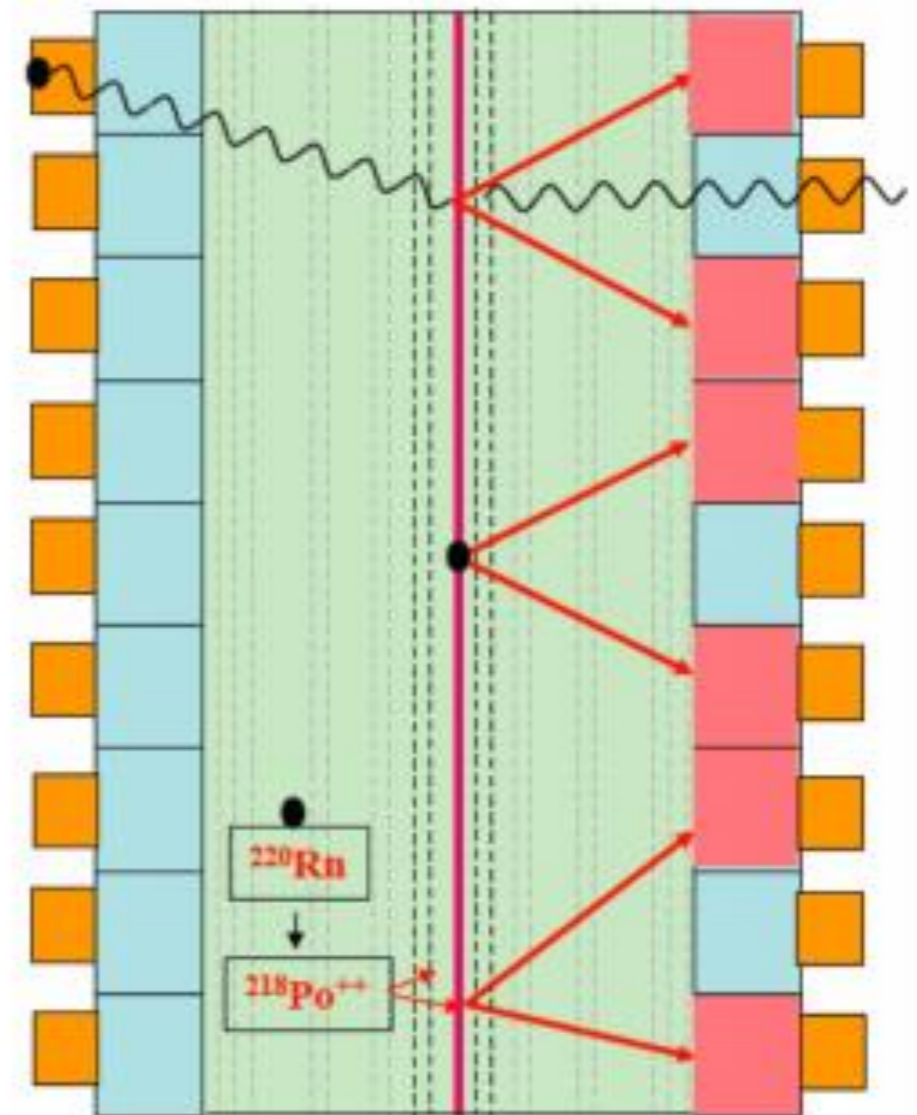
Radio-impurities of the detector



- Radon inside the tracking detector

Deposits on the wire near the  $\beta\beta$  foil

Deposits on the surface of the  $\beta\beta$  foil



Backgrounds are measured through different background channels using event topologies

# Квадрупольный бета-распад - $0\nu4\beta$

- Neutrinoless quadruple beta decay
  - Proposed by Heeck and Rodejohann [1]
  - Lepton number violating process
  - Neutrinos are Dirac particles and  $0\nu\beta\beta$  is forbidden
  - The best candidate is  $^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Gd} + 4e^-$  ( $Q_{4\beta} = 2.079 \text{ MeV}$ )
- Exploit the unique ability of NEMO-3 to reconstruct the kinematics of each  $e^-$
- No evidence of this decay

$$T_{1/2}^{0\nu4\beta} > (1.1 - 3.2) \times 10^{21} \text{ y}$$

According the model

- World's first limit on this process

