



Детектор нейтрино для мониторинга атомных реакторов

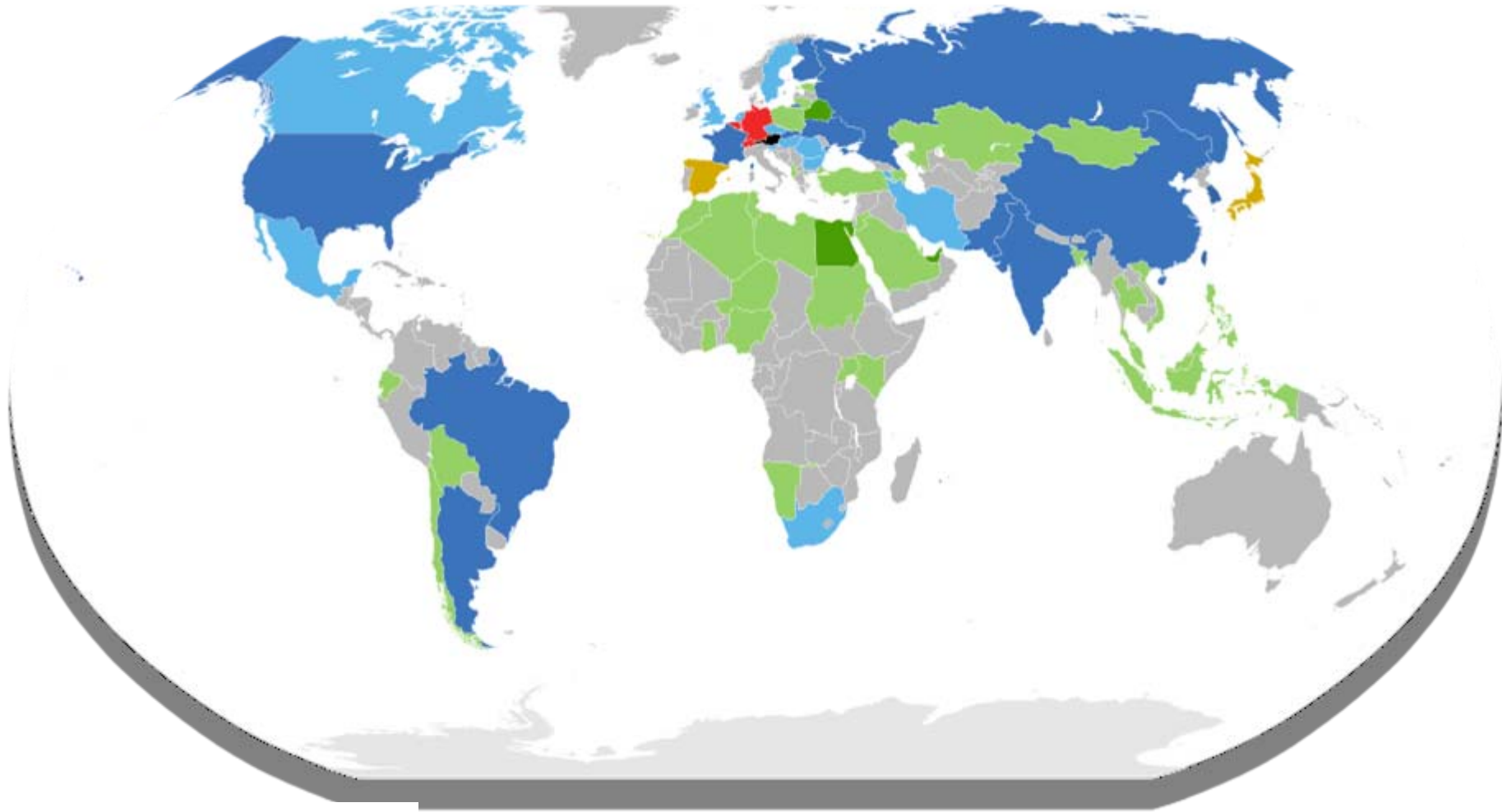
А. Чепурнов
НИИЯФ МГУ

Работы ведутся по гранту РФФИ - 12-02-12129 ОФИ-м



Свое выступление я посвящаю памяти Льва Александровича Микаэляна - научного руководителя нашего проекта

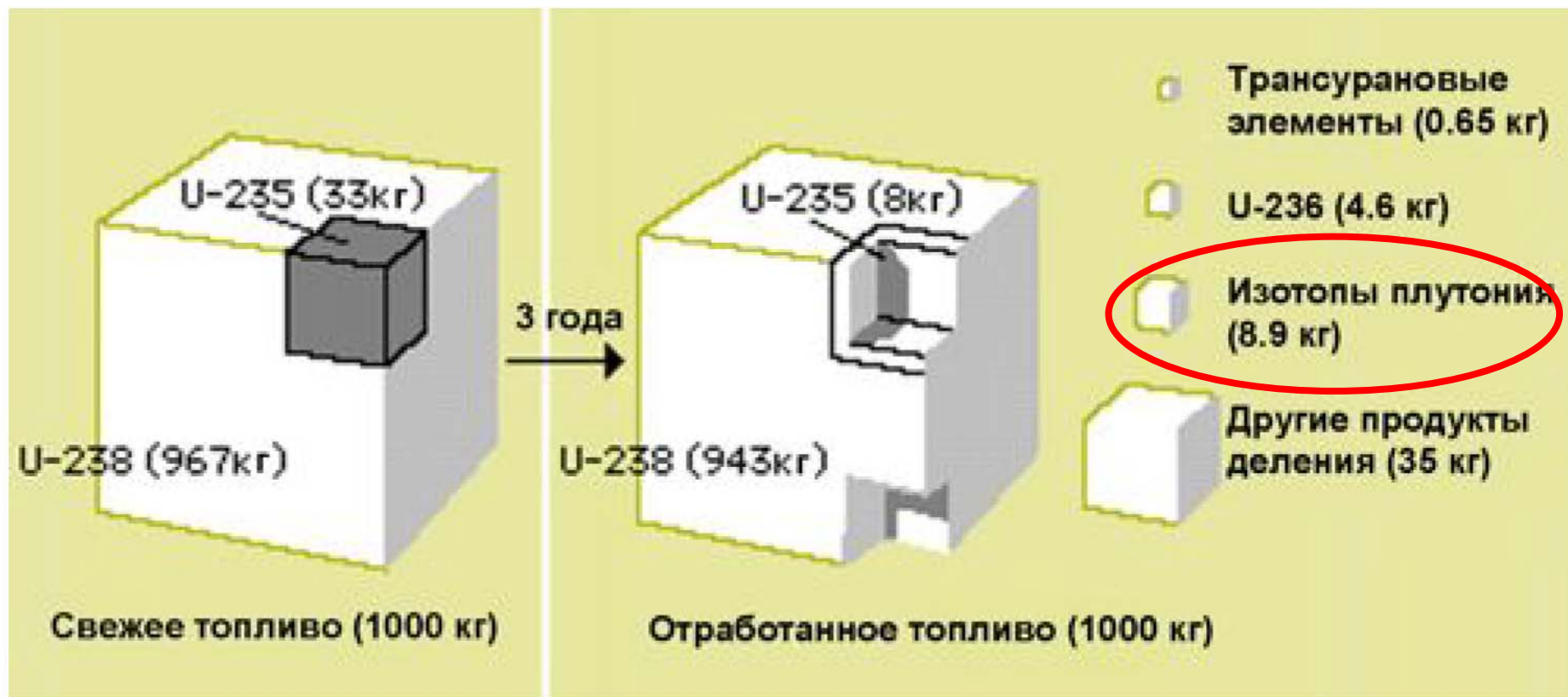


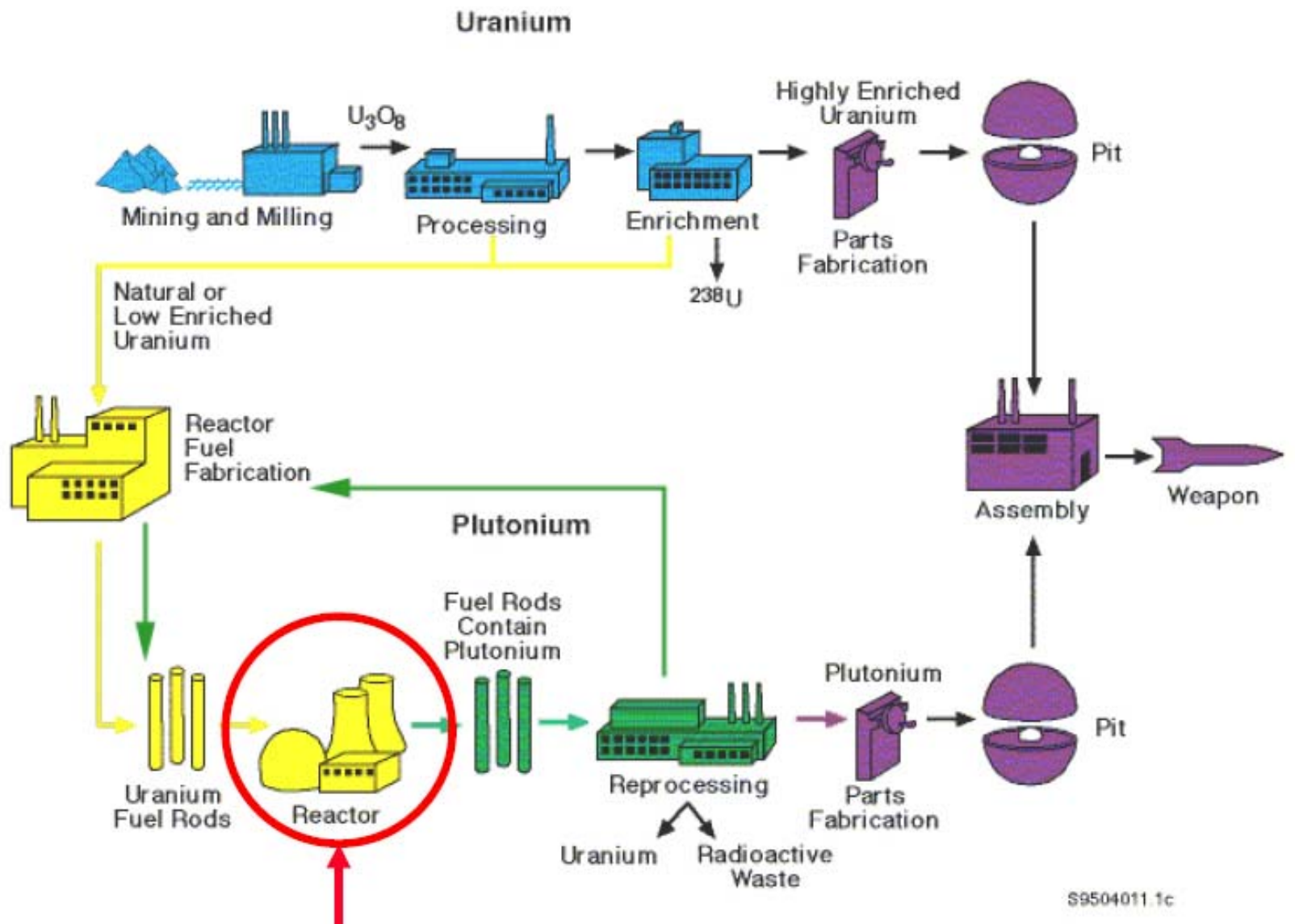


- Эксплуатируются АЭС, строятся новые энергоблоки.
- Эксплуатируются АЭС, планируется строительство новых энергоблоков
- Нет АЭС, станции строятся
- Нет АЭС, планируется строительство
- Эксплуатируются АЭС, строительство новых пока не планируется
- Эксплуатируются АЭС, рассматривается сокращение их количества
- Гражданская ядерная энергетика запрещена законом
- Нет АЭС

Ядерное топливо

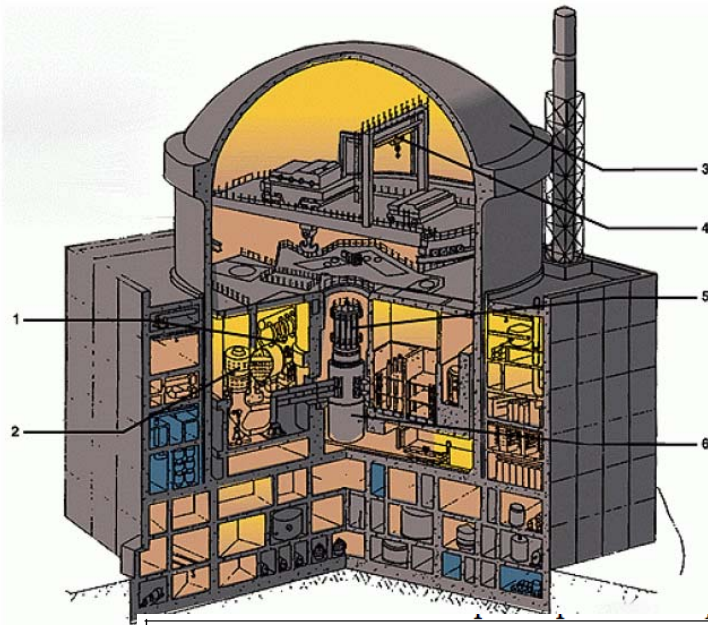
Таблетки из спеченного UO_2 обогащенного ^{235}U



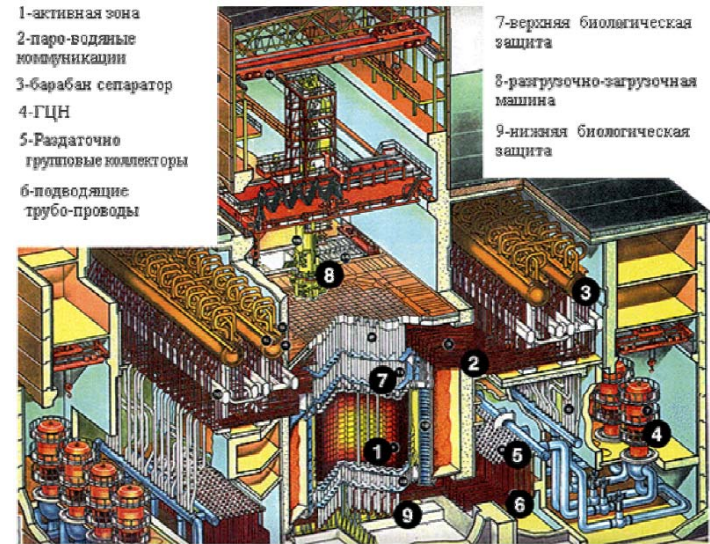


Энергетические ядерные реакторы

ВВЭР -1000



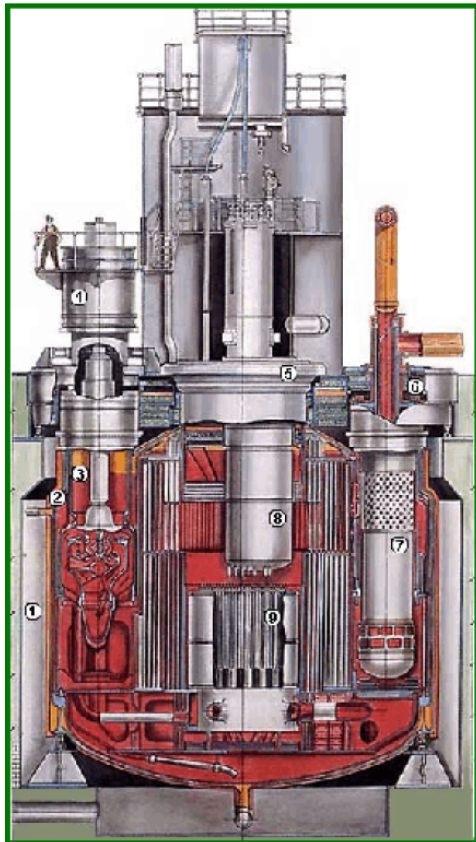
РБМК-1000



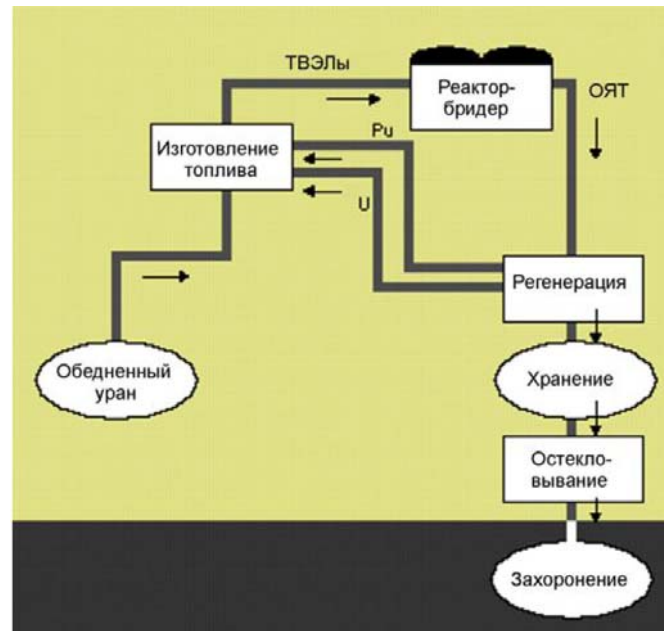
Параметр	Тип реактора			
	ВВЭР-440	ВВЭР-1000	РБМК-1000	РБМК-1500
Мощность (эл.), МВт	440	1000	1000	1500
Мощность (тепл.), МВт	1375	3000	3200	
Схема, число петель	Петлевая, 6	Петлевая, 4	Петлевая 7	Петлевая 7
Размер активной зоны:				
Н, м	2,46	3,56	11,8	11,8
D, м	2,88	3,10	18,5(22,3)	18,5
Глубина выгорания топлива, МВт-сут/кг ²³⁵ U	30	40	—	—
Плотность тепловыделения, кВт/л	86	111		
Температура теплоносителя в активной зоне, К, вход/выход	541/569	561/590	553*	553*
Давление в первом контуре (перед турбиной), Мпа	12,5	16	(6,5)	(6,5)
Обогащение ²³⁵ U, %	3,5	3,3-4,4	1,8-2	

Энергетические ядерные реакторы

БН-600

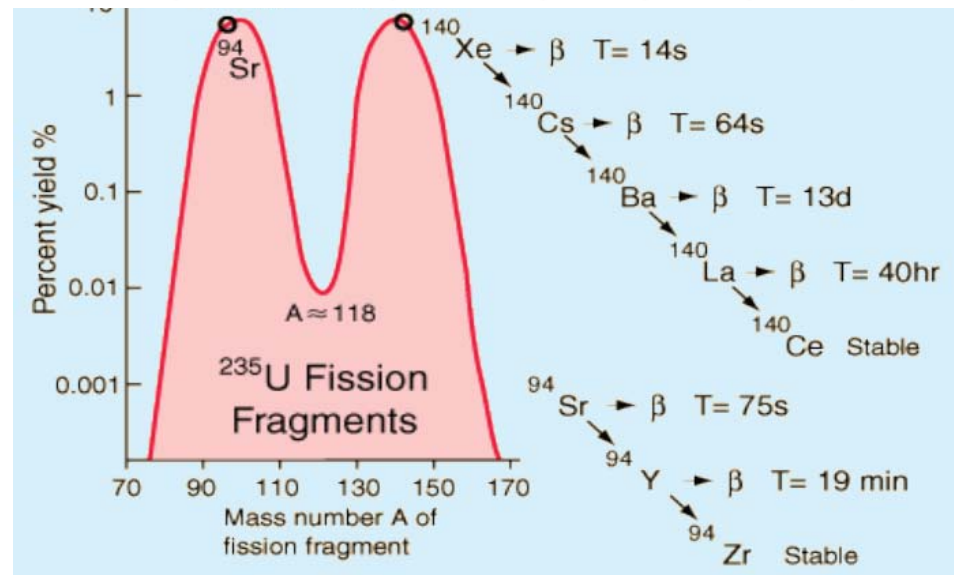
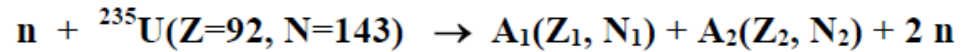
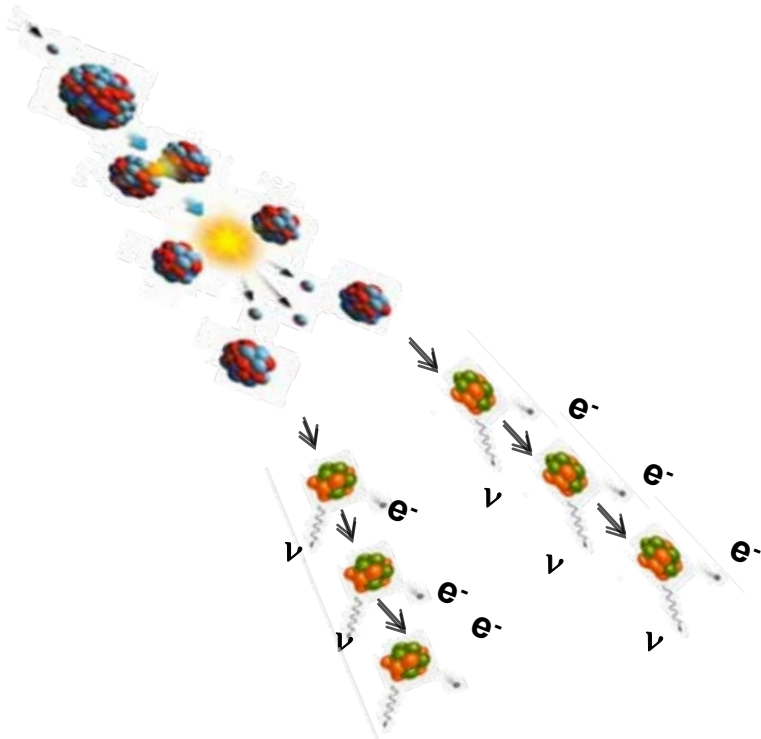


Параметр	Тип реактора		
	БН-350	БН-600	БН-1600
Мощность (эл.), МВт	150	600	1600
Мощность (тепл.), МВт	1000	1470	4000
Схема	Петлевая	Интегральная	Интегральная
Размер активной зоны:			
Н, м	1,06	0,75	1,0
V, м ³	2,08	2,57	9,0
Максимальная глубина выгорания, МВтсут/кг ²³⁵ U	55	96	96
Коэффициент воспроизводства	1,4	1,3	1,4
Максимальный нейтронный поток, 10 ¹⁵ нейтр./см ² ·с	8	10	10
Максимальная плотность тепловыделения, кВт/л	730	806	710
Температура теплоносителя в активной зоне, вход, К	773	823	820
Давление пара, Мпа	4,3	14,2	14,2
Температура пара, К	708	778	763

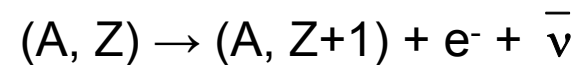


Откуда берутся реакторные антинейтрино

β -распад продуктов деления изотопов U и Pu

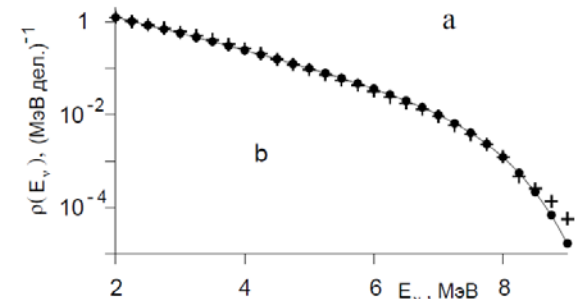


Нестабильные продукты деления являются источником антинейтрино.

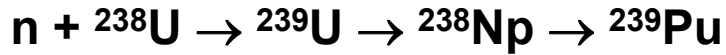


Тепловая мощность 1 МВт $\rightarrow 3 \times 10^{21}$ делений \rightarrow
 $\sim 2 \times 10^{22}$ $\bar{\nu}$ /день

Плотность потока анти-нейтрино, измеряемая дистанционно во время работы реактора, прямо пропорциональна числу делений или скорости выгорания ядерного топлива. (1 ГВт- 10^{13} $\bar{\nu}$ / см²×с)



Энергетический спектр антинейтрино



Группа Schreckenbach et al. провела тщательные измерения бетта-спектров ${}^{235}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$ и ${}^{241}\text{Pu}$. Затем бетта-спектры были конвертированы в спектры антинейтрино путем «специальной процедуры».

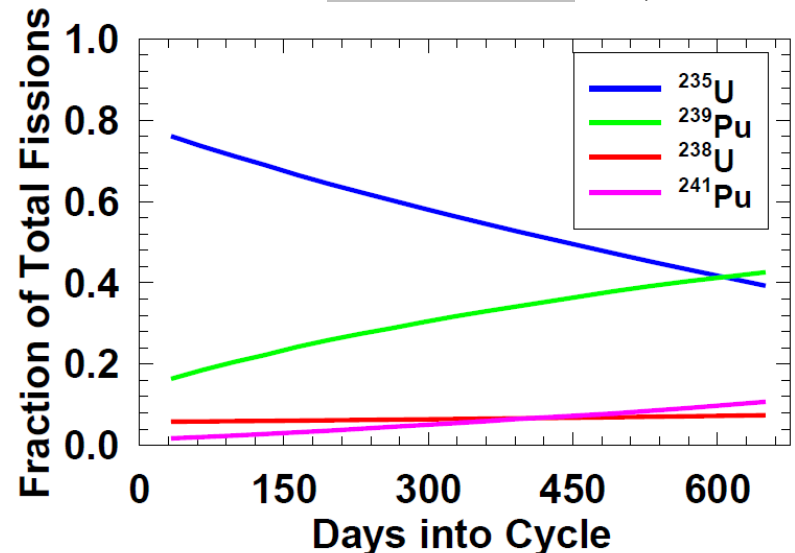
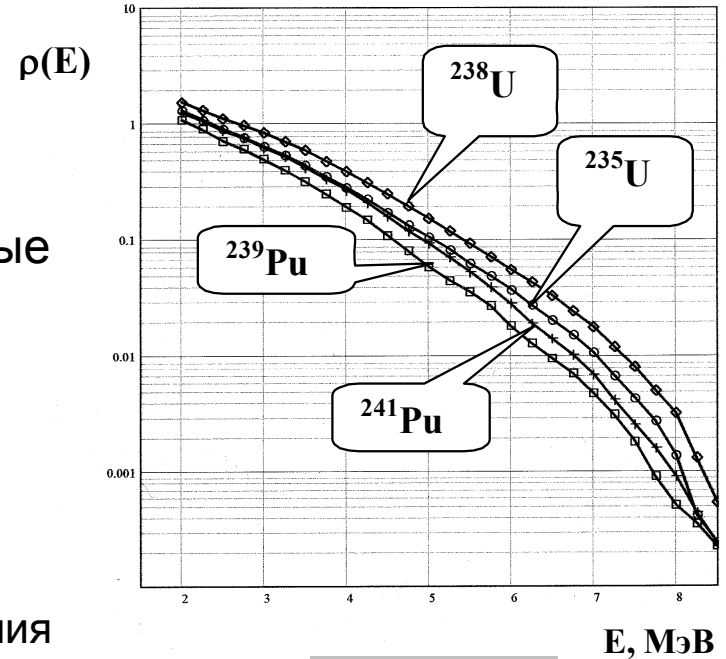
Неопределенность : 1.9%

1.3%(3MeV)÷9%(8MeV) – процедура преобразования

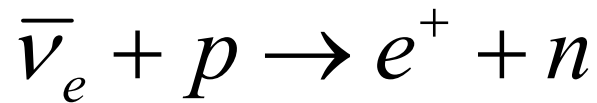
Для ${}^{238}\text{U}$ нет измеренных данных, есть только теоретические вычисления

*P.Vogel, G.K.Schenter, F.M.Mann, R.E.Schenter.
Reactor antineutrino spectra and their application
to antineutrino induced reactions.
Phys. Rev. C.,1981, v. 24, p. 1543-1553.*

Мы исходим из того, что точность с которой мы знаем спектр оценивается в 3%



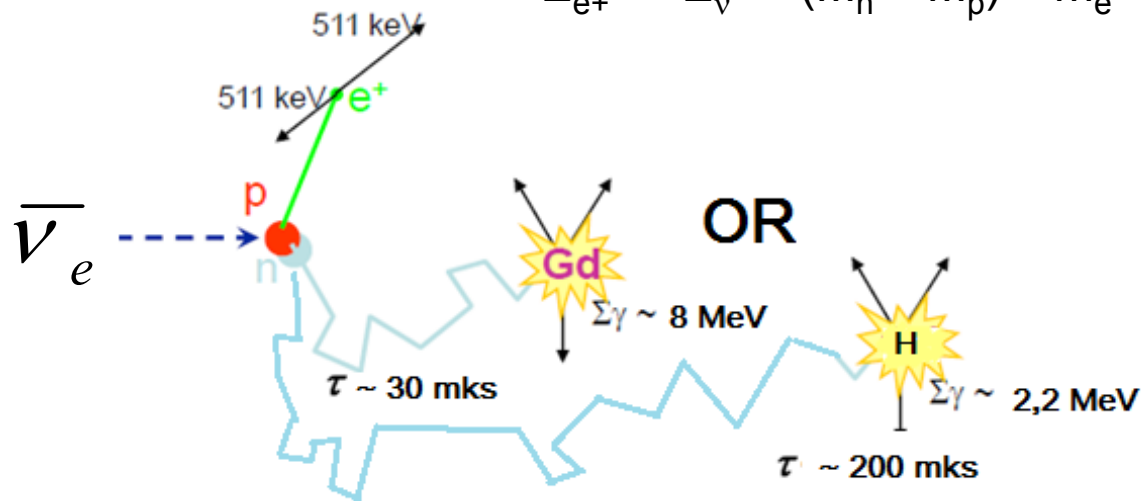
Обратный бета-распад – основной процесс для детектирования антинейтрино в ЖС детекторах



$$\sigma \sim 10^{-43} \text{ см}^2$$

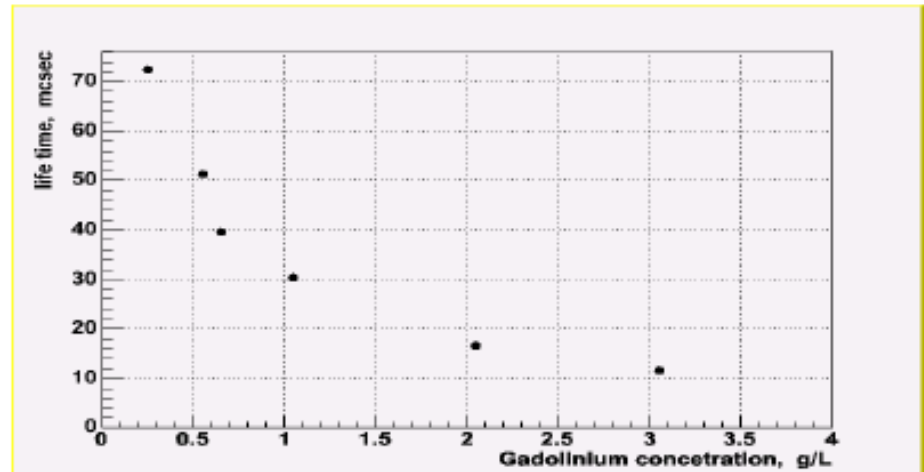
$$dN_{e^+}(E_{e^+})/dE_{e^+} = dN_{\nu}(E_{\nu})/dE_{\nu} \times N_p \times (4\pi L^2)^{-1} \times \sigma(E_{\nu}) \times \delta_{\text{REC}}$$

$$E_{e^+} = E_{\nu} - (M_n - M_p) - m_e = E_{\nu} - 1.804 \text{ MeV}$$

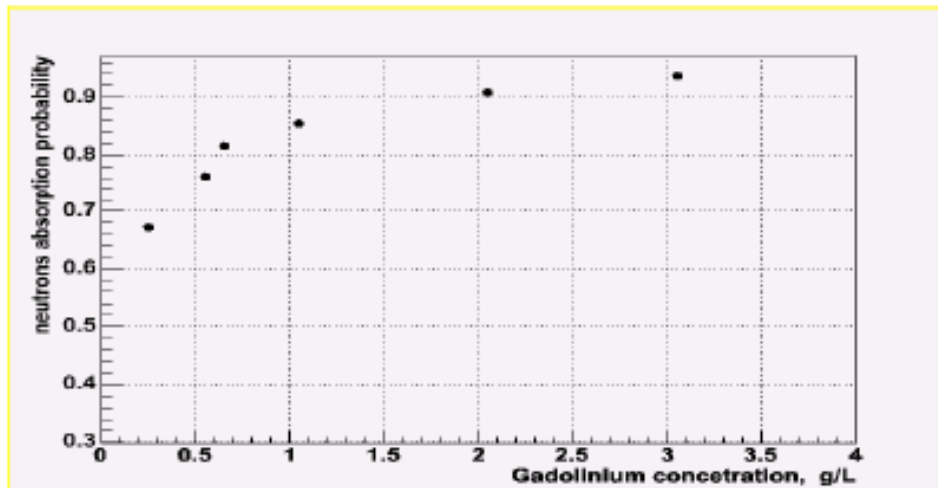


Жидкий H-содержащий сцинтиллятор допированный Gd/Cd
или
пластиковый сцинтиллятор со слоями Gd/Cd

Эффект от добавления Gd



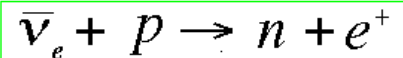
Время жизни нейтронов в зависимости от концентрации гадолиния.



Вероятность захвата нейтронов гадолинием в зависимости от его концентрации

История детектирования нейтрино от реакторов

- Впервые продемонстрировано - F.Reines and C.L.Cowan с помощью ЖС-детектора



Detection of the Free Neutrino*

F. REINES AND C. L. COWAN, JR.

*Los Alamos Scientific Laboratory, University of California,
Los Alamos, New Mexico*

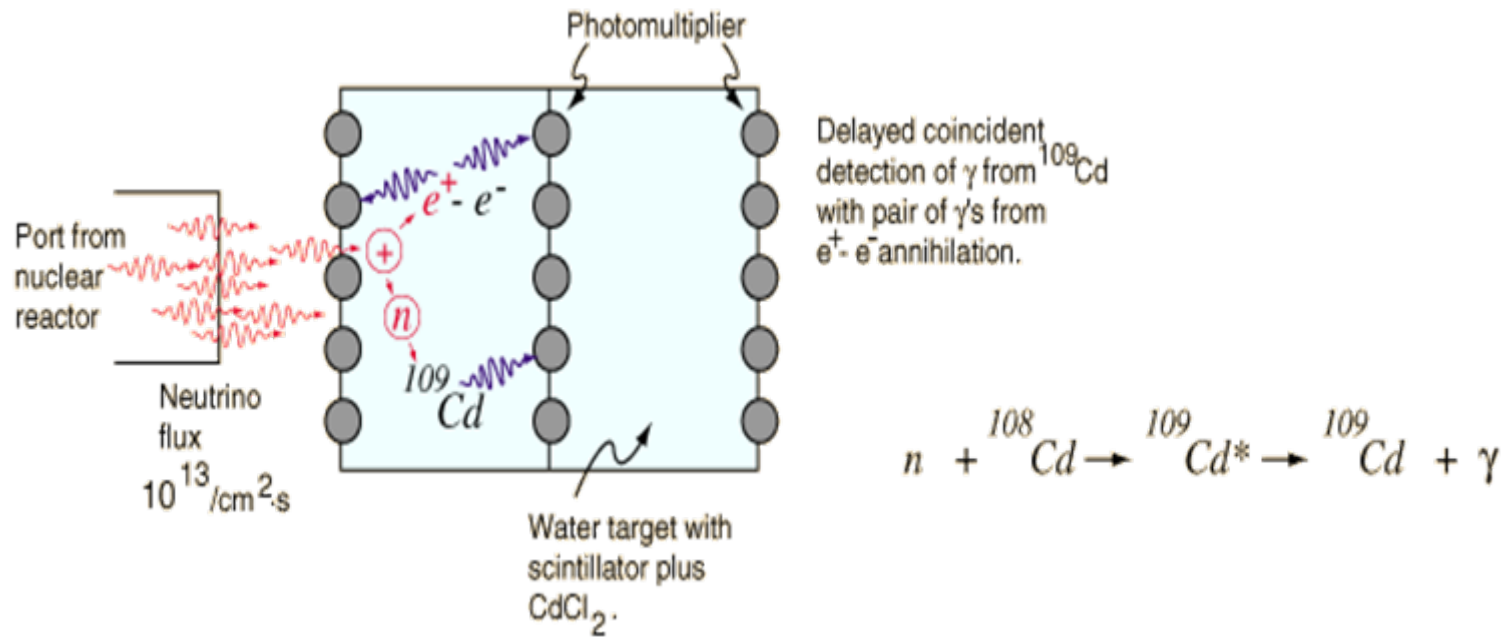
(Received July 9, 1953; revised manuscript received September 14, 1953)

Large Liquid Scintillation Detectors*

C. L. COWAN, JR., F. REINES, F. B. HARRISON,
E. C. ANDERSON, AND F. N. HAYES

*Los Alamos Scientific Laboratory, University of California,
Los Alamos, New Mexico*

(Received February 24, 1953)



"Detection of the Free Neutrino: A Confirmation", C. L. Cowan, Jr., F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse and A. D. McGuire, Science 124, 103 (1956).

value. The measured cross section for fission antineutrinos on protons was

$$\bar{\sigma}_{\text{exp}} = (12_{-4}^{+7}) \times 10^{-44} \text{ cm}^2$$

compared to the theoretically expected value (13)

$$\bar{\sigma}_{\text{th}} = (5 \pm 1) \times 10^{-44} \text{ cm}^2$$

Frederick Reines -
Нобелевская премия 1995 за
его работы в области физики
нейтрино

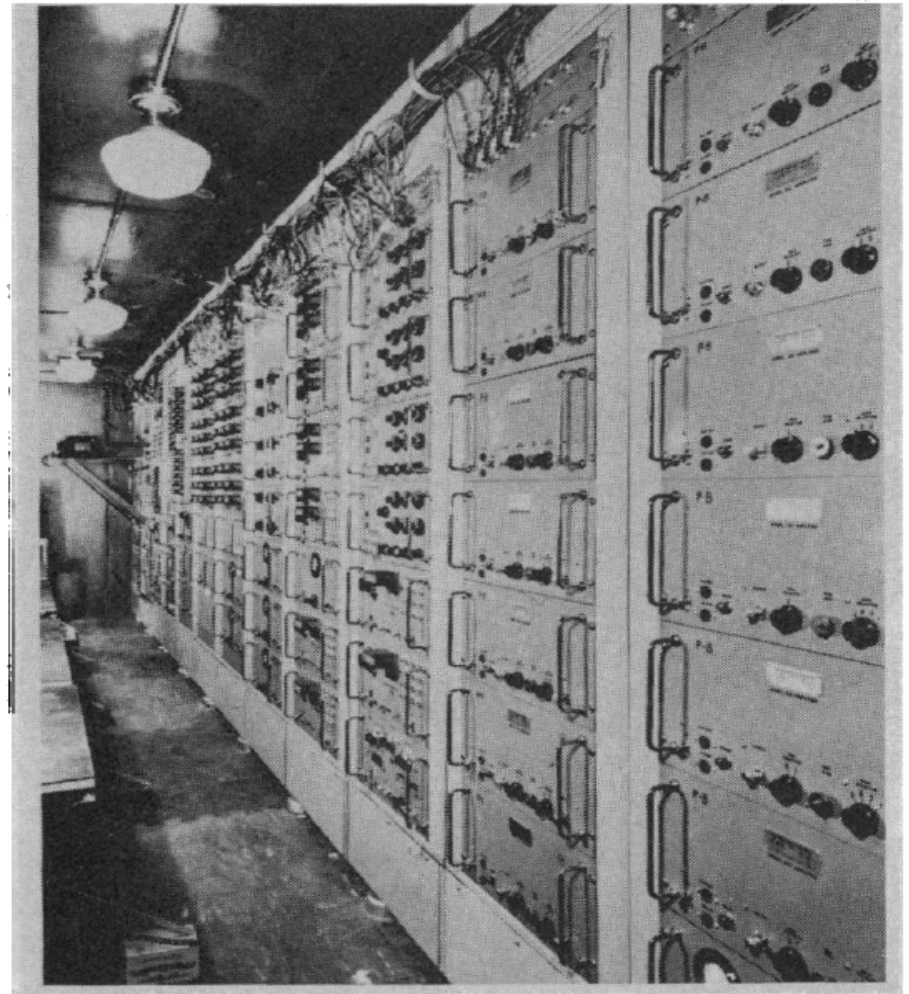
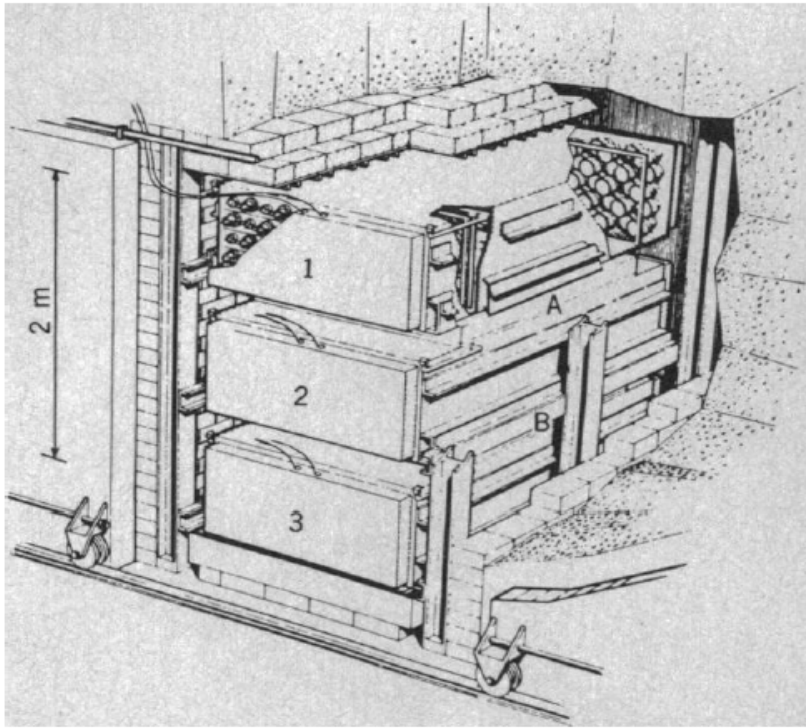


Fig. 6 (left). Sketch of detectors inside their lead shield. The tanks marked 1, 2, and 3 contained 1400 liters of triethylbenzene (TEB) liquid scintillator solution, which was viewed in each tank by 110 5-inch photomultiplier tubes. The TEB was made to scintillate by the addition of *p*-terphenyl (3 grams per liter) and POPOP [1,4-bis-2-(5-phenyloxazolyl)benzene] wavelength shifter (0.2 g per liter). The tubes were immersed in pure nonscintillating TEB to make light collection more uniform. Tanks A and B were polystyrene and contained 200 liters of water, which provided the target protons and contained as much as 40 kilograms of dissolved CdCl_2 to capture the product neutrons. **Fig. 7 (right).** Inside view of electronics van showing equipment required to select and record neutrino signals.

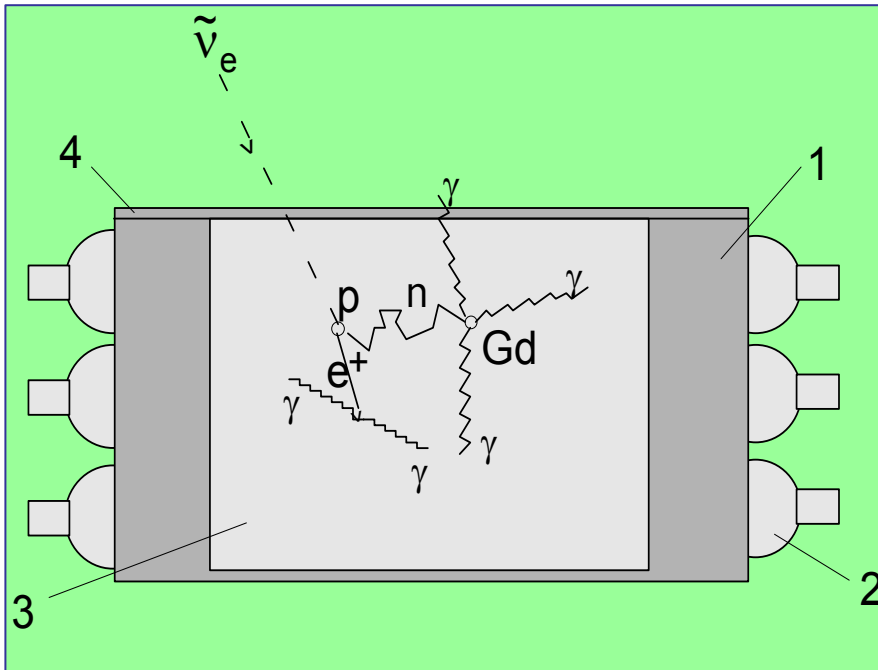
ЖС детекторы

Антинейтрино детектируется за счет «задержанного совпадения»:

- «позитронное» событие $T = E(\bar{\nu}_e) - 1.8\text{MeV}(\text{threshold}) + m_e c^2$

- захват нейтрона $n + H \& Gd \rightarrow \gamma \dots (2.2\text{MeV}(\sim 200\text{mks} - 20\%) \& \sim 8\text{MeV}(\sim 30\text{mks} - 80\%))$

3 MW реактор (ВВЭР-1000) излучает $\sim 6 \times 10^{20} \bar{\nu}/\text{сек}$ $\frac{1}{4}$ энергия $> 1,8 \text{ MeV}$



Преимущества:

- сигнал/шум 1:10
- эффективность 60%
- возможности измерения спектра
- дискриминация по форме импульса
- работа в реальном времени

Недостатки :

- утекание гамма-квантов, что приводит к снижению эффективности и росту ошибок в определении спектров

ЖС детектор RONS (Курчатовский институт)

Ровенская АЭС– ВВЭР-440

Отношение сигнал/фон 1:10

Эффективность (η) 60%



- 1 – корпус (акрилик)
- 2 – внутренний объем для ЖС
- 3 - гамма кэтчер 540 л
- 4 - чувствительный объем - 510 л
- 5 - отражатели
- 6 – светосбор (масло минеральное)
- 7 - ФЭУ-125
- 8 – тележка

R = 18 м 1000 событий/день
(1.4ГВт)

200 Фоновых событий в день

Основная проблема – деградация Gd-ЖС

*Климов Ю.В., Копейкин В.И., Микаэлян Л.А., и др.
Измерение спектра электронных антинейтрино
ядерного реактора// Ядерная физика, 1990, Т.52,
вып.6(12), с.1579-1584*

Детектор WIND (Курчатовский институт)

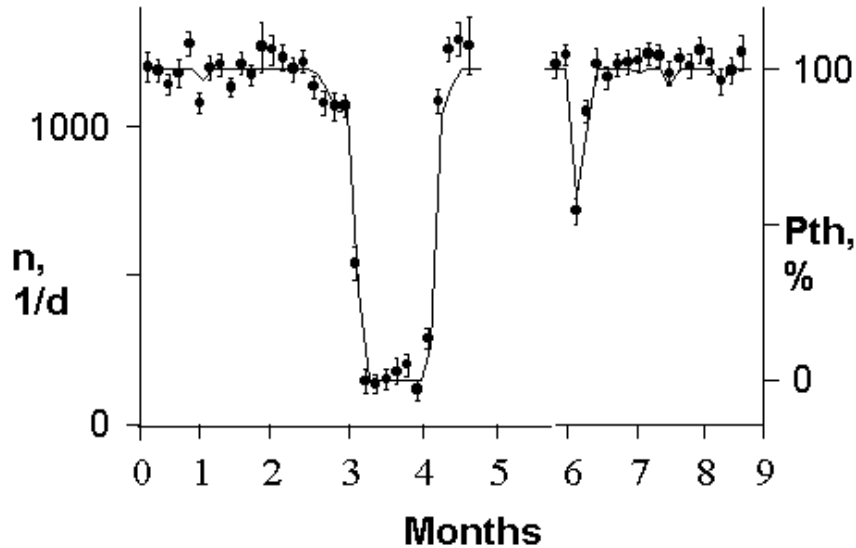
Детектор интегрального типа для регистрации только нейтронов .



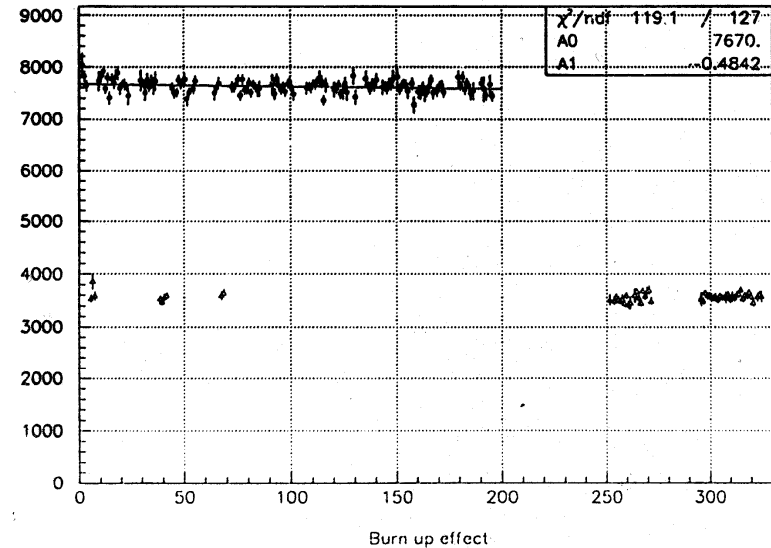
Не подходит для мониторинга реакторов поскольку возможна фальсификация данных n- источником

Экспериментальное подтверждение нейтринного метода

Детектор RONS



Детектор WIND



Приведенные данные показали возможность :

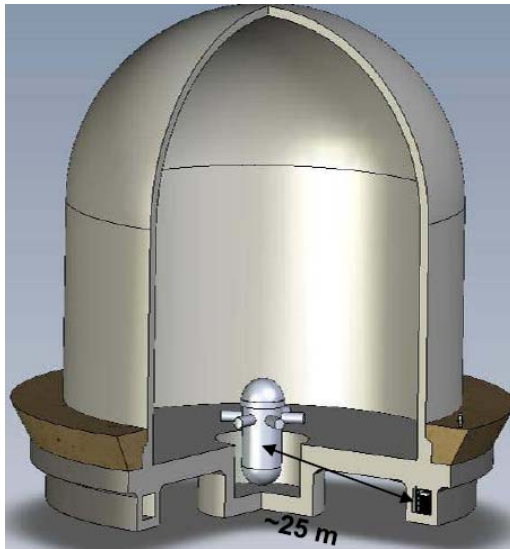
- контроля за процессом выгорания топлива в реальном времени

Счет событий $\sim 2-3 \times 10^3$ 1/день

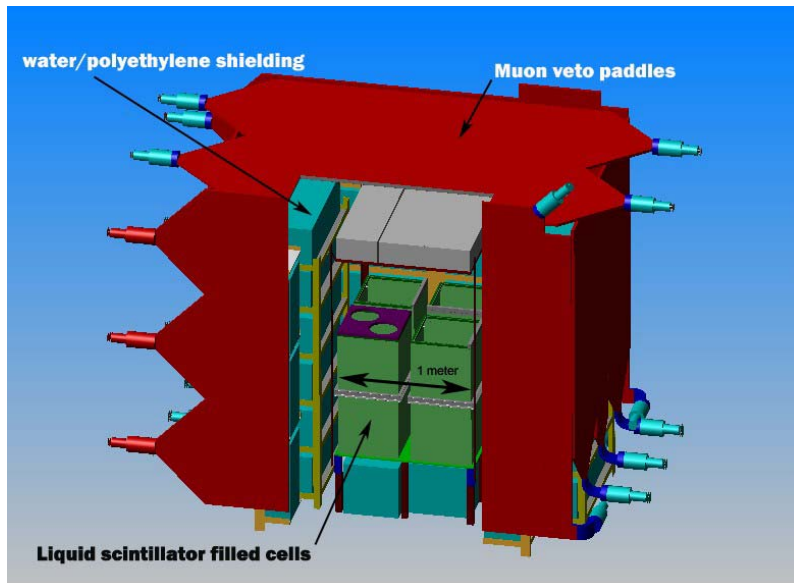
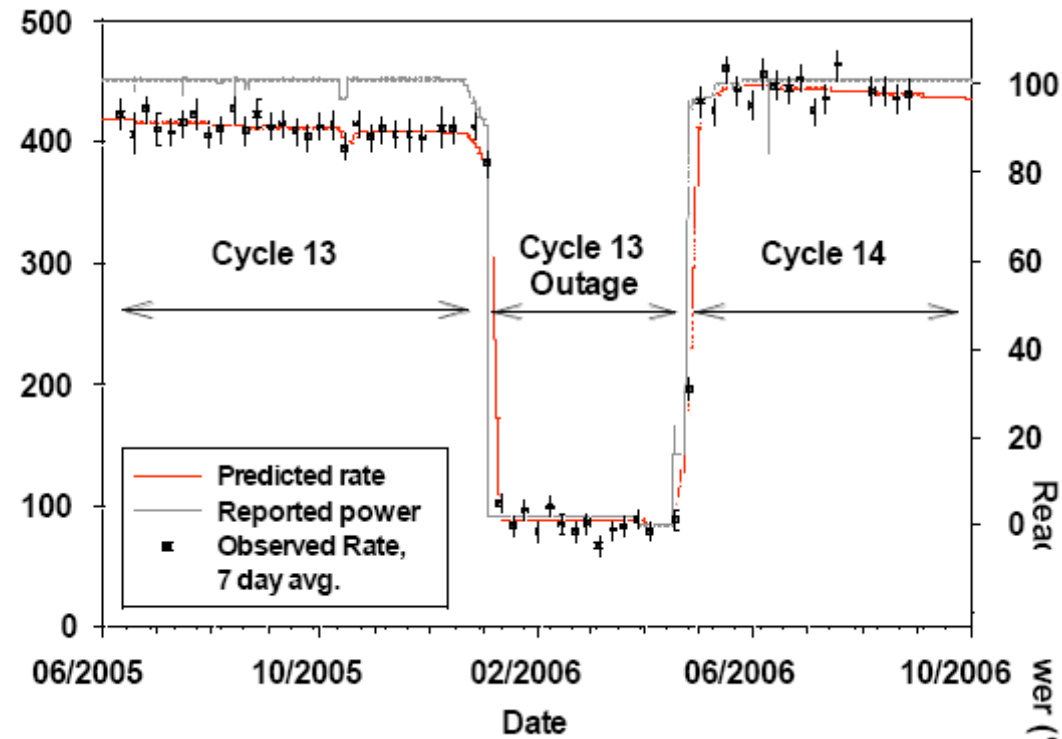
- провести оценку содержания плутония в топливе
- определить остановку реактора в течении одного дня

Форма спектров антинейтрино в момент рождения в процессе деления актиноидов в активной зоне детектируется неизменной в чувствительном объеме детектора.

Детектор SONGS 1 (Sandia/LLNL)



SONGS1 Measurement, 2005-2006

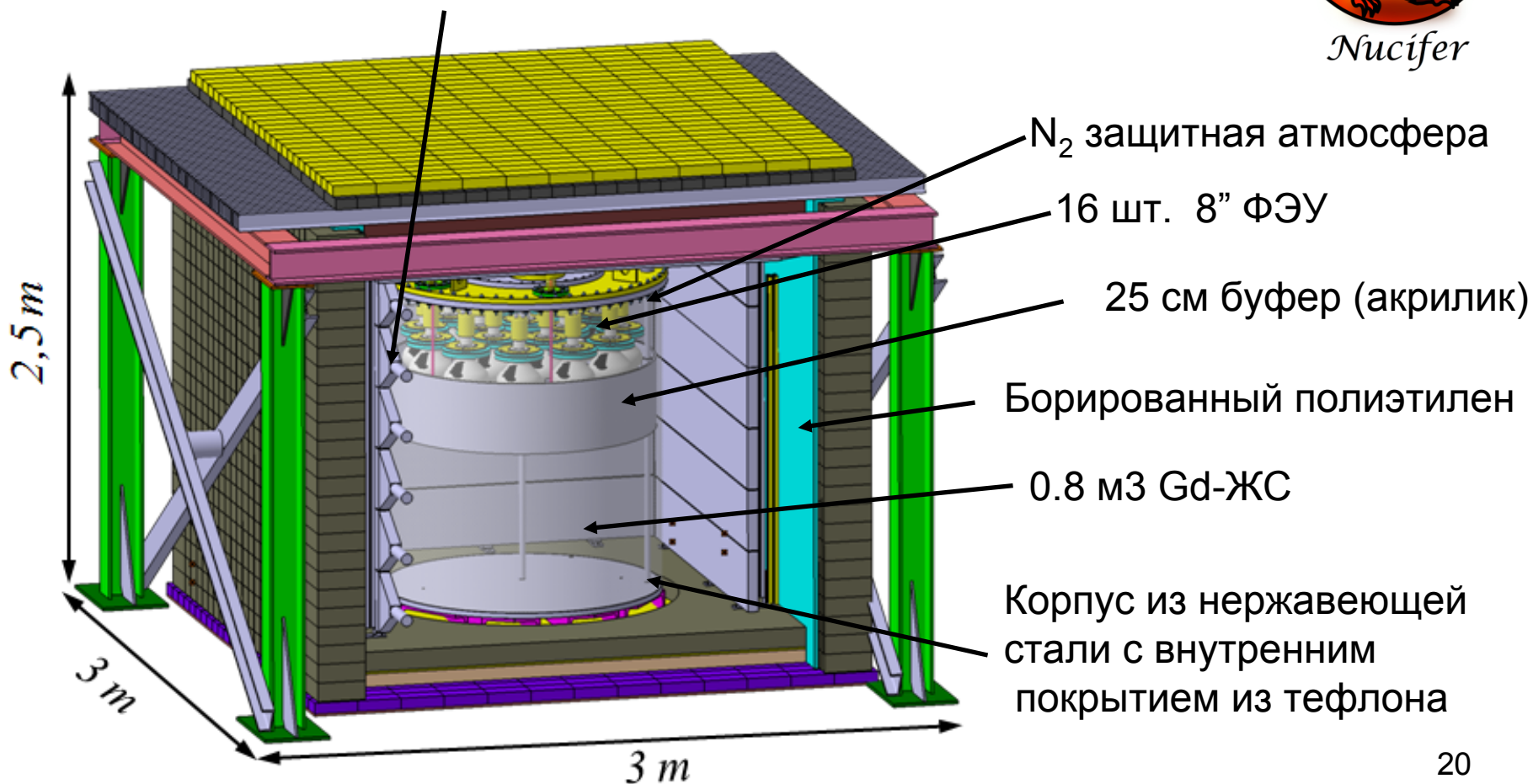


Детектор Nucifer (Saclay)

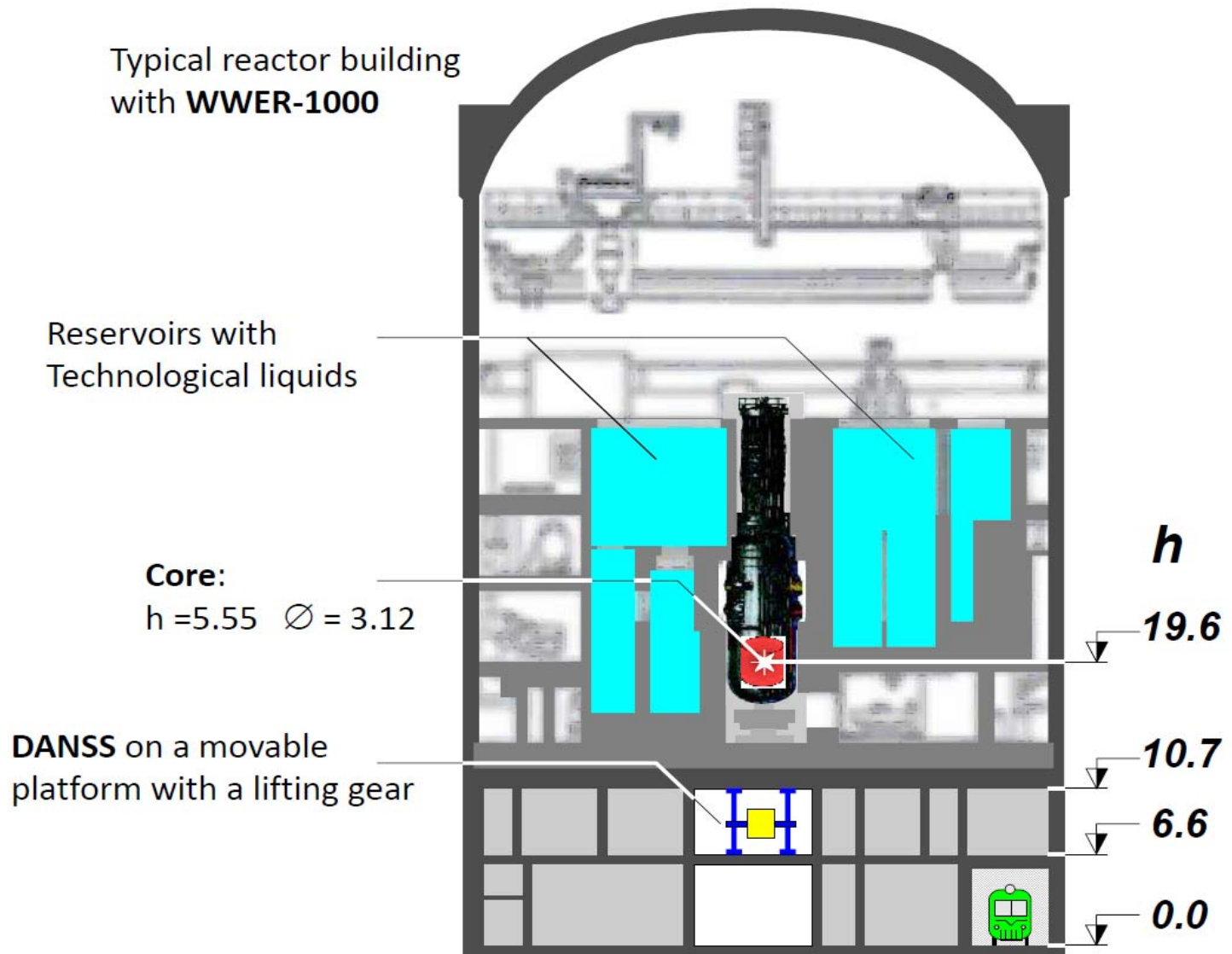


Nucifer

4т пластиковый сцинтиллятор – мюонное вето (30 ФЭУ)



Детектор DANSS (ОИЯИ)



Прикладная физика нейтрино сегодня

Запрос от ядерной энергетики – удаленный мониторинг процесса выгорания топлива и дополнительный (независимый) способ измерения тепловой мощности реактора для подтверждения безопасного режима работы активной зоны реактора.

Обеспечение режима нераспространения делящихся материалов по программам МАГАТЭ (INFCIRC/153, INFCIRC/540) :

- выявление несанкционированного производства плутония,
- контроль за процессом накопления плутония в топливе,
- контроль за активной зоной реактора с целью фиксации момента несанкционированной остановки с целью несанкционированного извлечения плутония

Предлагаемый подход – детектирование потока антинейтрино в реакции обратного бета-распада что делает невозможным фальсификацию данных.

Реализация данного подхода требует, что бы детектор был промышленным т.е. :

простым в серийном производстве, не дорогим, работающим в режиме «черного ящика» и не требующим обслуживания.

История прикладной физики антинейтрино в России

1974-1977

Исследование спектров антинейтрино (КИАЭ):
- вычисление спектров от ^{235}U и ^{239}Pu , ^{238}U и ^{241}Pu .
-Измерение спектров от ^{235}U и ^{239}Pu .

Было показано, что количество антинейтрино на акт деления ^{239}Pu меньше, чем при делении ^{235}U . *A.Borovoi, Yu.Dobrunin, V.Kopeikin. Nucl. Phys. (Rus.), 1977, 25, 264*

1977

Идеи высказанные Л.А. Микаэляном во время конференции “*Neutrino-77*”:
- скорость счета антинейтринных событий дает возможность удаленного мониторинга вырабатываемой реактором мощности, за счет прямой зависимости между $N(\text{antineutrino}) \sim N(\text{fissions})$,
- форма спектров антинейтрино может быть источником дополнительной информации об изотопном составе активной зоны реактора

1978-1982

Несколько типов детекторов для исследований антинейтрино от реакторов было разработано (КИАЭ)

1983-1994

техико-экономическое обоснование метода было подтверждено в экспериментах на Ровенской АЭС (СССР) и, позже, на АЭС в Бюже (Франция) (КИАЭ IN2P3).

Начало промышленной фазы

2003-2006

НИОКР – промышленный прототип компактного необслуживаемого ЖС детектора для реализации программы нераспространения
(РНЦ Курчатowskiй и-т, НИИЯФ МГУ, ВНИИА им. Духова)

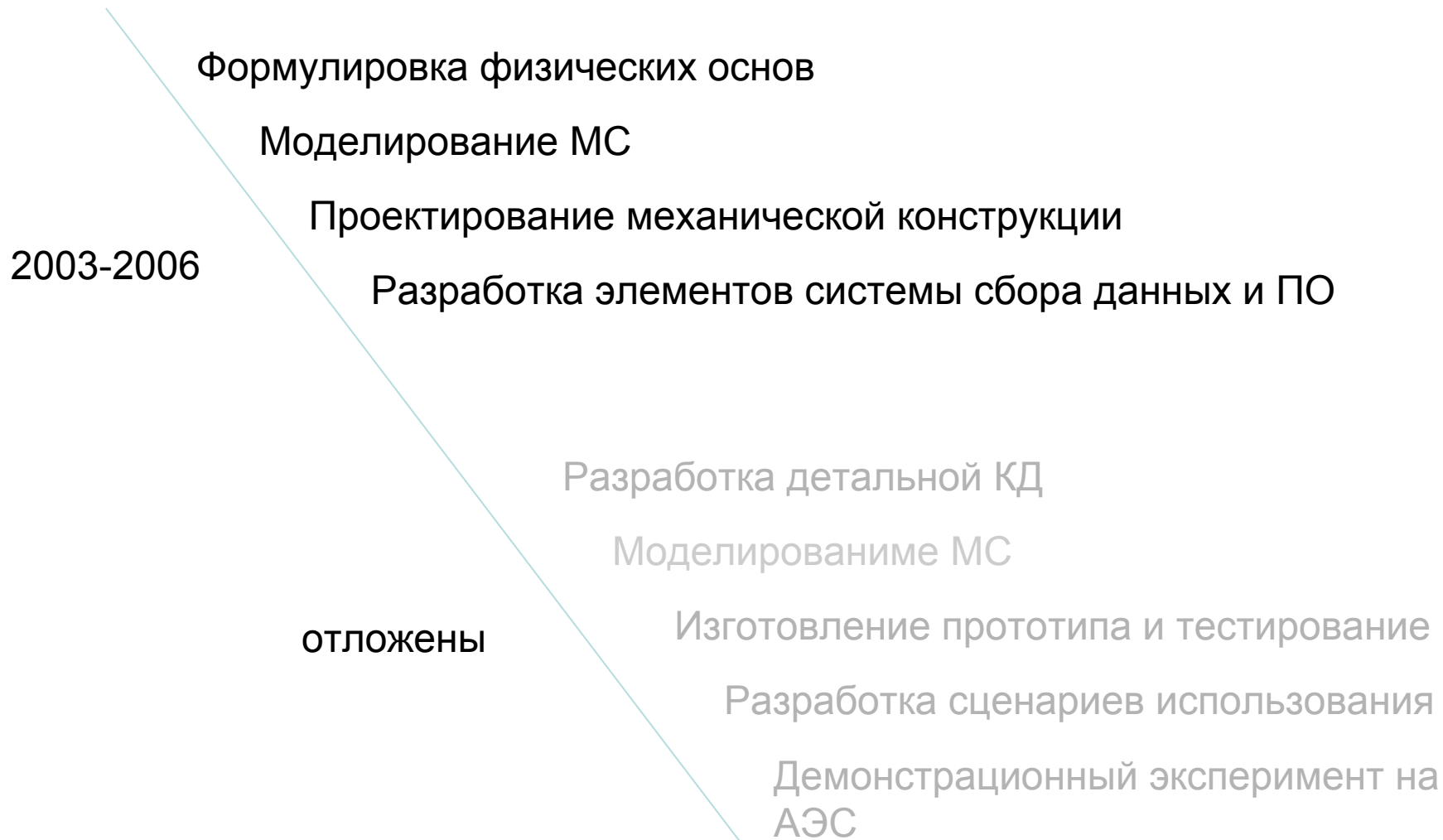
2011- now

Мегагрант МИФИ - Использование двухфазного низкотемпературного детектора и эффекта когерентного рассеяния нейтрино для мониторинга активной зоны реактора. Колаборация РЭД.

2012-now

ОФИ-м РФФИ Создание прототипа промышленного жидкостцинтилляционного детектора для мониторинга режимов работы атомных реакторов нейтринным методом (НИИЯФ МГУ, РНЦ Курчатowskiй и-т, ИЯИ РАН, ВНИИА им. Духова)

Стадии НИОКР по разработке промышленного детектора антинейтрино.



Что изменилось с 2006 по 2012 гг

Стабильные Gd-ЖС были разработаны и в промышленных масштабах производятся для



J.S. Park, J. Lee, et al. , Production and optical properties of Gd-loaded liquid scintillator for the RENO neutrino detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2012.12.121>

C.Aberle, C.Buck, B.Gramblich F.X.Hartman, M.Lindner, S.Schonert, U.Schwan, S.Wagner, H.Watanabe, Large scale Gd-beta-diketonate based organic liquid scintillator production for antineutrino detection, arXiv: 1112.5941v2[physics.ins-det] 25Jun 2012.

И.Р. Барабанов, Л.Б. Безруков и др. ЛАБ как базовый растворитель для создания жидких сцинтилляторов большого объема. Препринт ИЯИ РАН 1279/2011

Высоко производительная электроника стала доступной –
flash ADC для **дискриминации по форме импульса**
FPGA для организации триггеров в реальном времени



RUS



IT

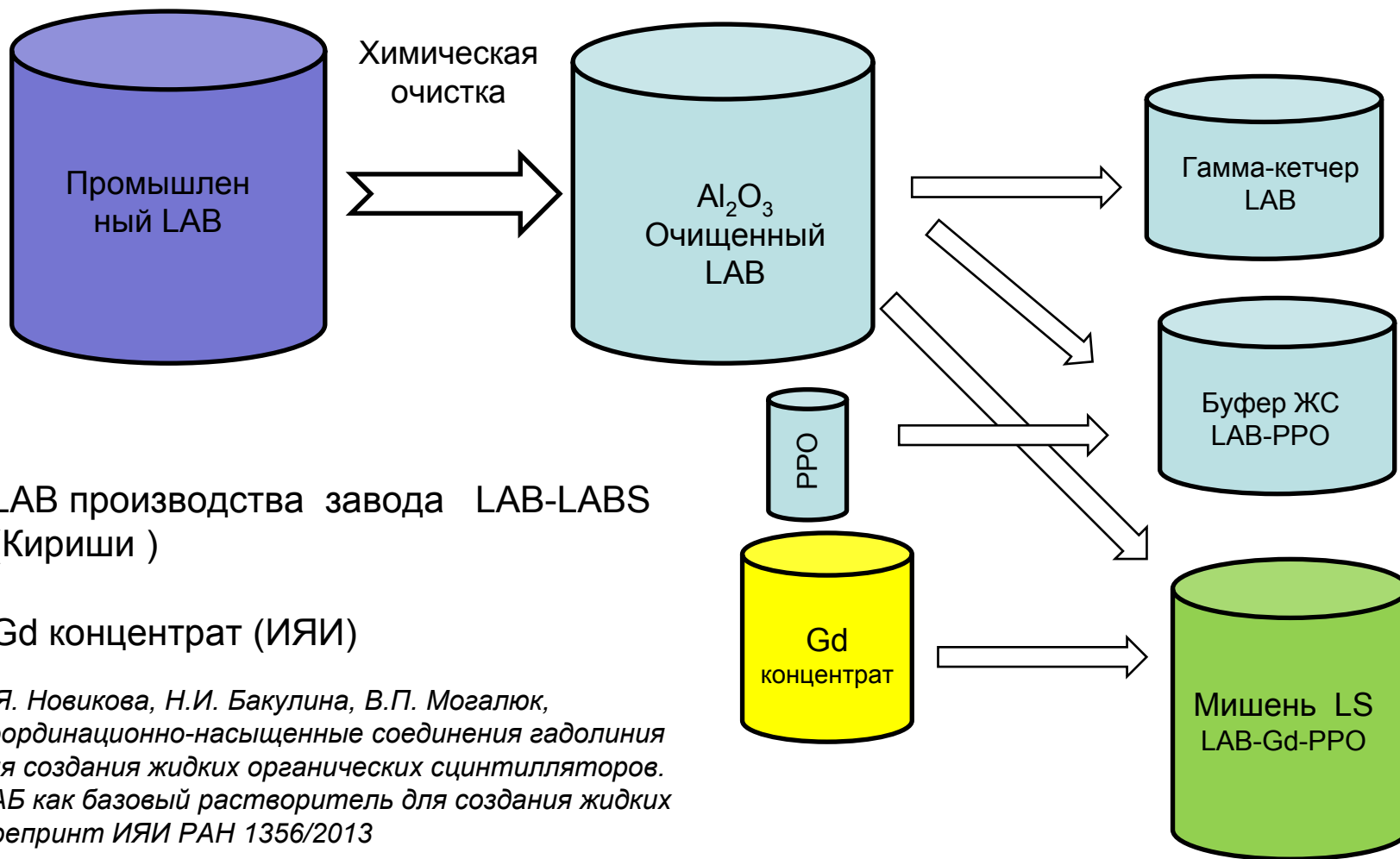


D

Стадии НИОКР по разработке промышленного детектора антинейтрино.



Цикл изготовления жидкого сцинтиллятора

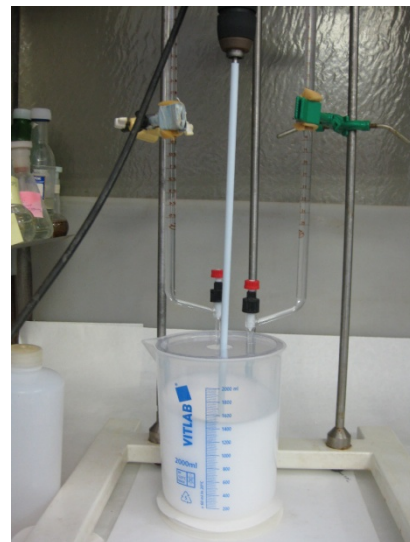
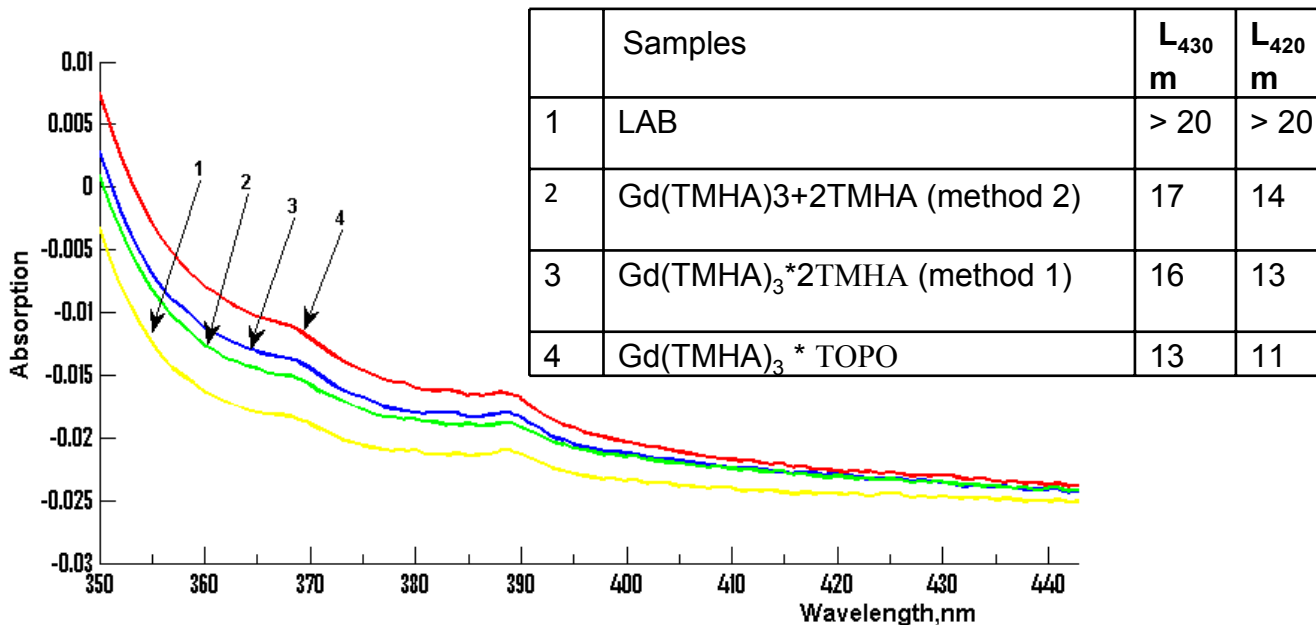


Gd концентрат (разработка группы Новиковой Г.Я. из ИЯИ)

Созданы координационно-насыщенные соединения гадолиния на основе триметилгексаната гадолиния $Gd(TMHA)_3$ с добавками триоктилфосфиноксида (ТОПО) и свободной 3,5,5-триметилгексановой кислоты. Получены 0,1% растворы Gd в ЛАБе (линейном алкилбензоле) и измерены их оптические свойства.

Два метода были использованы:

1. предварительный синтез и очистка твердых комплексов с последующим их растворением в ЛАБ с добавлением кислотного лиганда в соотношении 1:3
2. синтез в процессе жидкостной экстракции в водном растворе солей Gd с добавлением кислоты и конечного растворителя ЛАБ



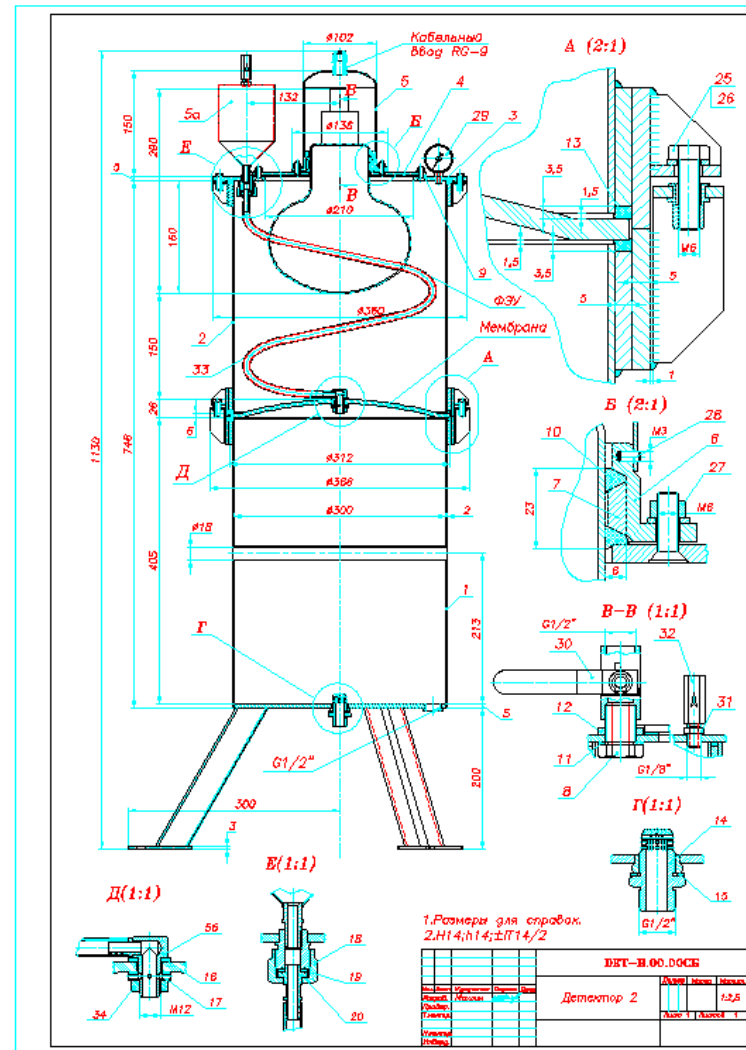
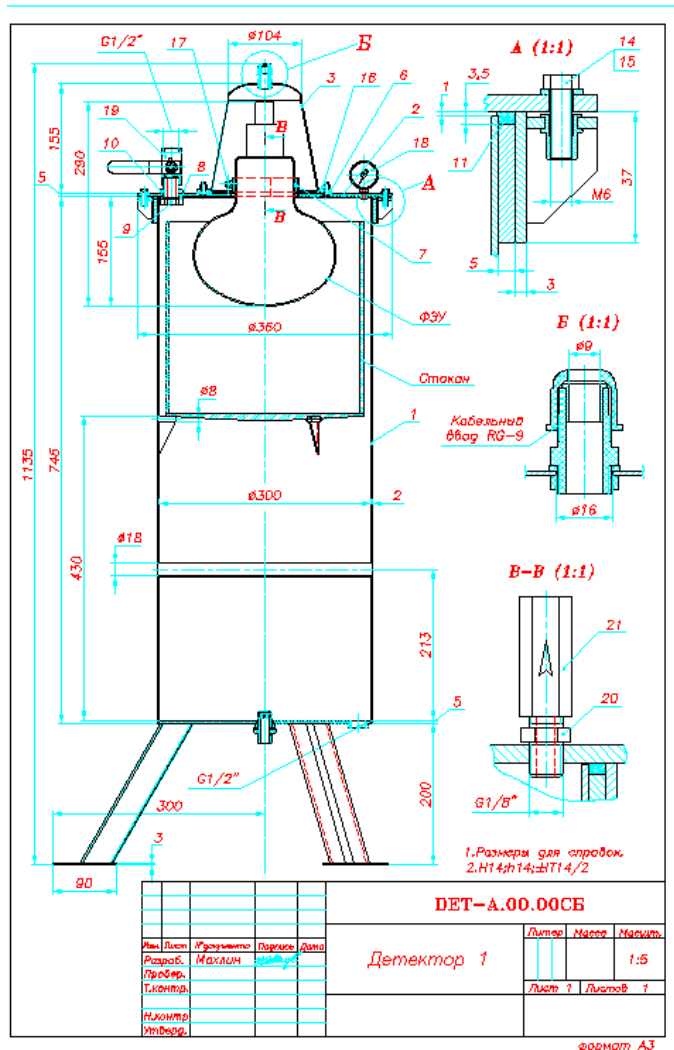
Прозрачность образцов ЛАБ и 0.1% раствора $Gd(TMHA)_3$ комплекса в ЛАБ.

Gd-ЖС на основе LAB (прозрачность)

Прозрачность образцов LAB и 0.1% раствора Gd (ТМНА) комплекса в LAB.

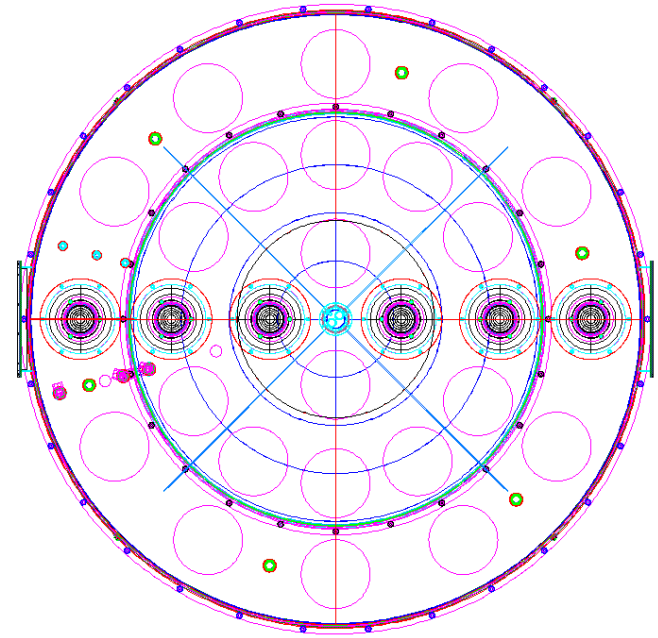
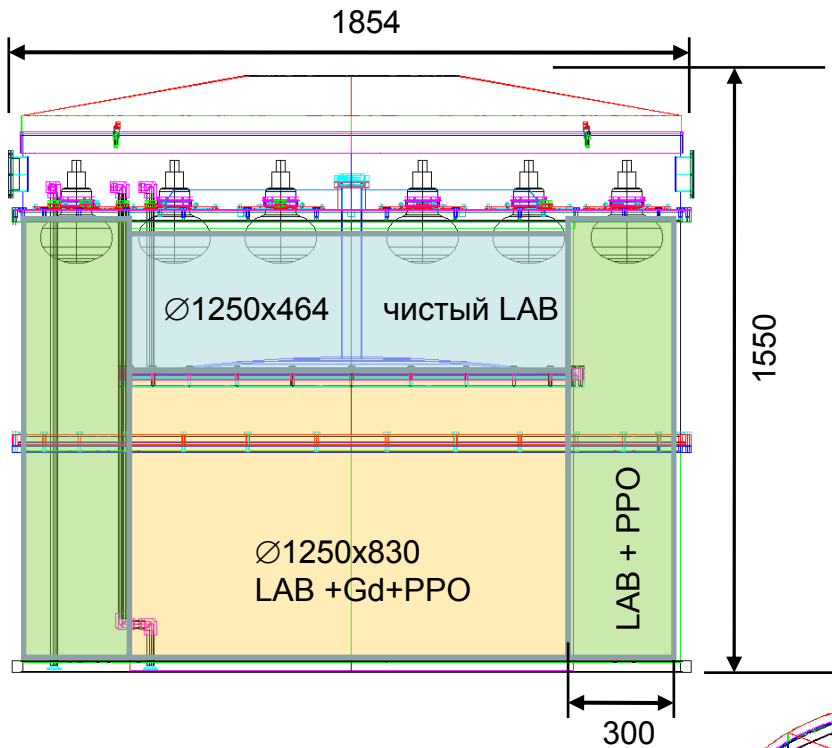
Sample	A_{\min} , nm	A_{430} , nm	L_{430} , m	A_{420} , nm	L_{420} , m
LAB промышленный	-0,0227	-0,0150	5	-0,132	4
LAB (1:6 очищенный)	-0,0256	-0,0246	> 20	-0,0244	> 20
LAB+ТМНА	-0,0274	-0,0259	> 20	-0,0257	> 20
Gd(ТМНА) ₃ +2ТМНА ("экстракция")	-0,0260	-0,0235	17	-0,0230	14
Gd(ТМНА) ₃ +3ТМНА ("экстракция")	-0,0283	-0,0257	16	-0,0252	14
Gd(ТМНА) ₃ *2ТМНА ("твердая соль")	-0,0251	-0,0224	16	-0,0218	13
Gd(ТМНА) ₃ * ТОРО	-0,0229	-0,0196	13	-0,0192	11
Gd(ТМНА)₃ + 3ТМНА (готовы первые 30 л для тестов)	-0,0271	-0,0236	12	-0,0231	10

30 л прототипы для предварительных тестов

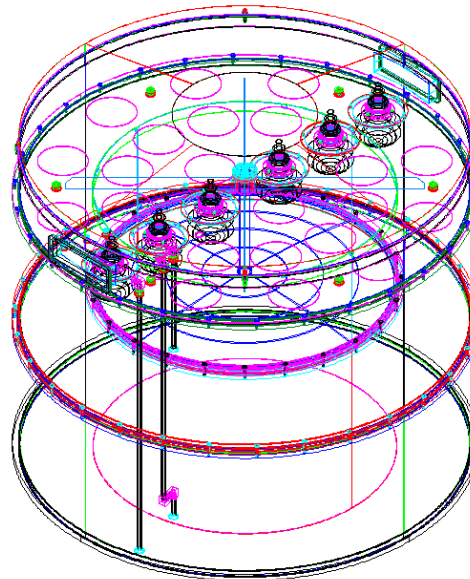


- Проверка совместимости конструкционных материалов с ЖС
- Проверка конструкционных решений
- Проверка электронных трактов ФЭУ
- Измерение параметров ФЭУ и ЖС (Сентябрь – октябрь 2013)

Корпус детектора



- Внутренняя мишень с Gd
 \varnothing -1250x830 mm
- ФЭУ гамма-кэтчер и световыравниватель
 \varnothing -1250x464 mm
- Гамма-кэтчер утечки - 300 x1300 mm
- Внешний корпус \varnothing - 1854 mm
- Мембрана из оргстекла 6 mm



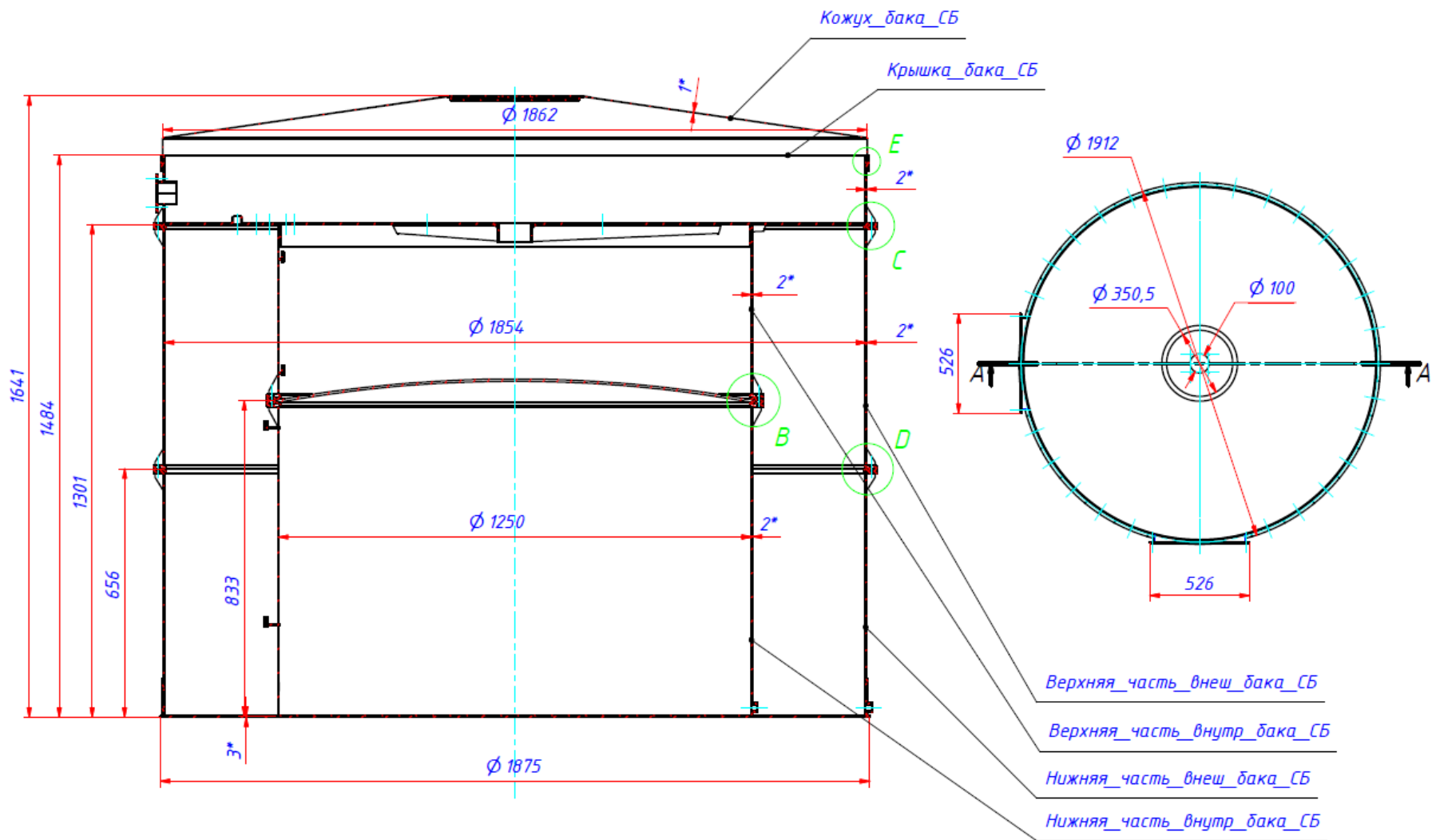
600 kg of 2 mm
 AISI 321 (08X18H10T)

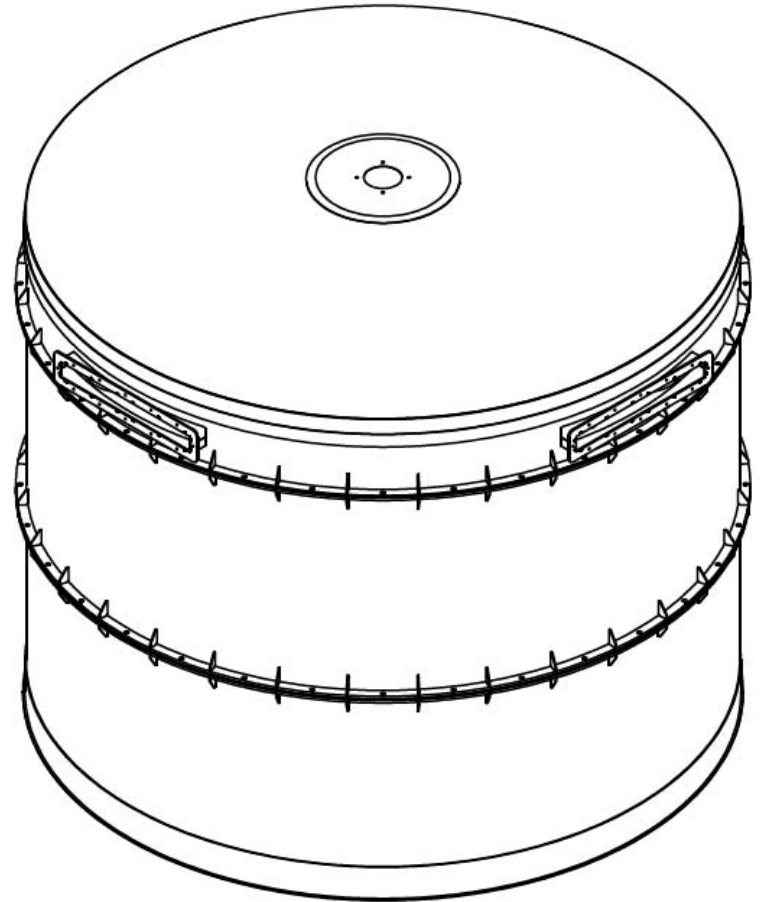
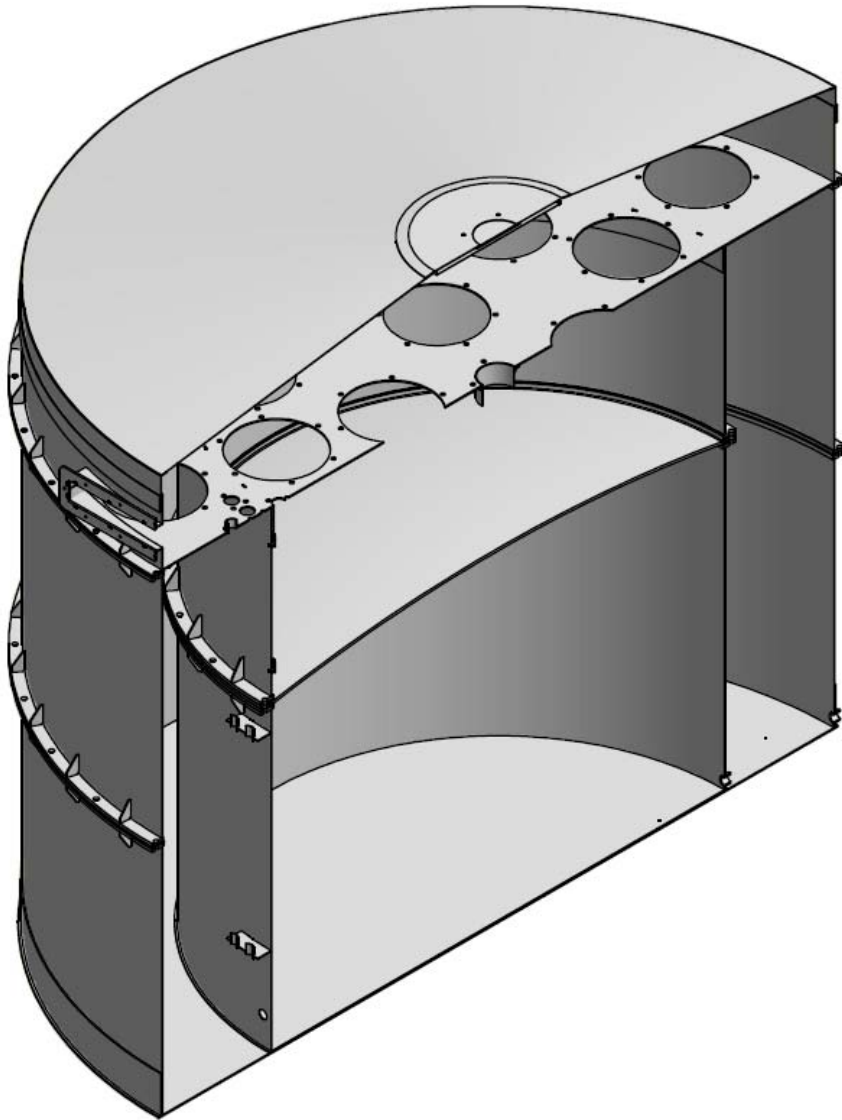
	Sample 1	Sample 2
	ppb /mBq/kg	ppb/mBq/kg
Th	2.2 / 9	8.4 / 34
U	<0.01 / 0.1	2.6 / 32

20% accuracy of ICP-MS

Ноябрь 2013

A-A (1:10)



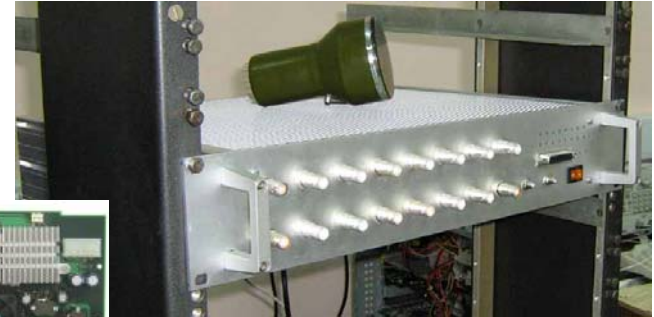


Электроника

Front-end

Сумматоры-дискриминаторы 19" с
встроенными декауплерами и управлением по
шине CAN (готовы)

DAQ 1Gs/s flash ADC PCI



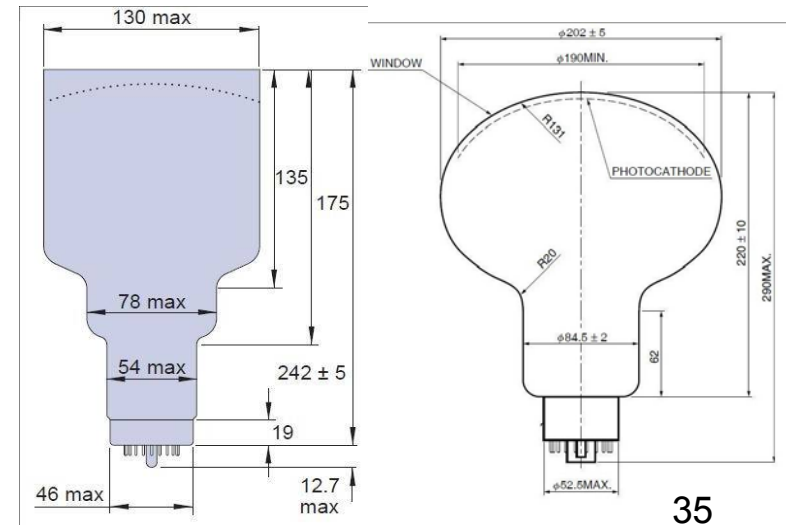
Slow control

Распределенная система управления
с шиной CANopen и промышленными
модулями ввода/вывода (заказано)



ФЭУ : ФЭУ-49, НАМАМАТСУ R5912, ETE 9823

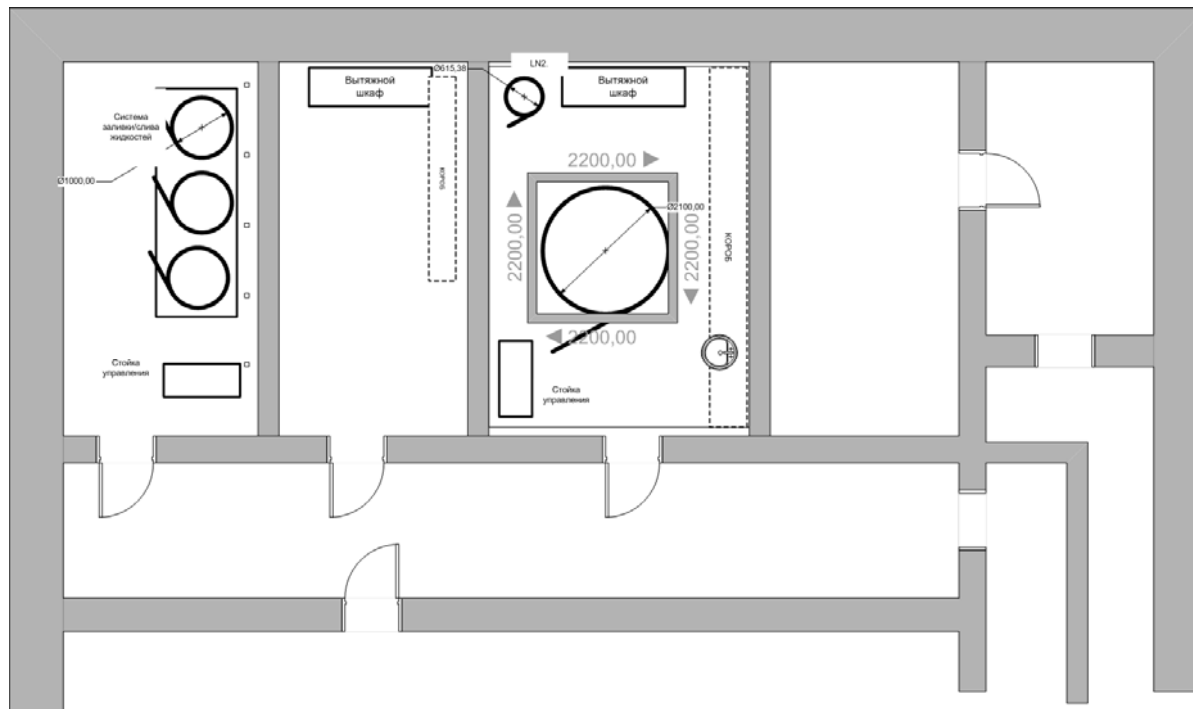
ФЭУ ВВ: CAEN HV Multichannel Power Supply
System



Выбор места для физического пуска детектора.

Фаза 1 – гидравлические испытания и первый запуск – Курчатовский институт (Ноябрь 2013)

Фаза 2 – физический пуск, измерение фона и нейтронный калибровки НИИЯФ (Декабрь 2013 – Февраль 2014)



Возможное место размещения - 19 корпус, подвал РХЛ

Использование ЖС-детектора нейтрино в НИИЯФ МГУ

- Решение задач прикладной физики нейтрино
- Отработка экспериментальных методик для научных реакторных экспериментов
 - разработка и исследование свойств новых ЖС
 - исследование свойств ФЭУ и других современных детектирующих приборов
 - разработка и испытание электронных трактов и программного обеспечения для систем сбора и обработки данных
- Обучение студентов современным методикам регистрации ядерных излучений с применением ЖС и современных спеткрметрических электронных трактов.

Заключение

Проект находится в активной стадии. Запуск детектора запланирован на I квартал 2014 г.

Предполагается его продолжение вплоть до проведения демонстрационного эксперимента на атомной станции .

Приглашаются студенты и другие заинтересованные лица к участию в проекте.