

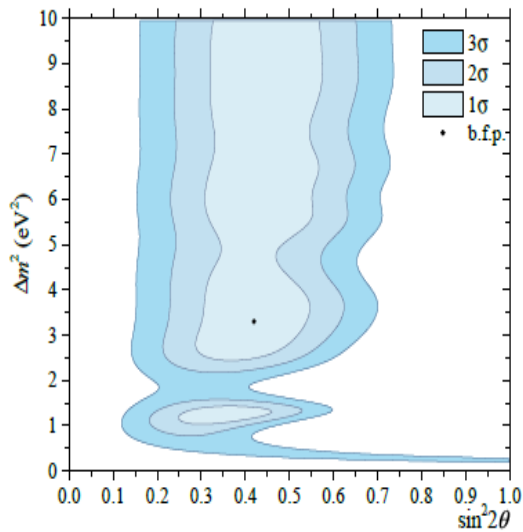
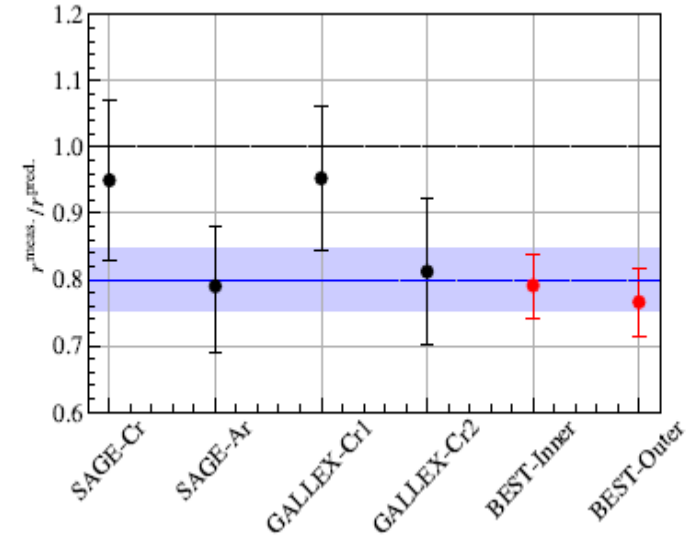


## Эксперимент BEST-2 с источником $^{65}\text{Zn}$

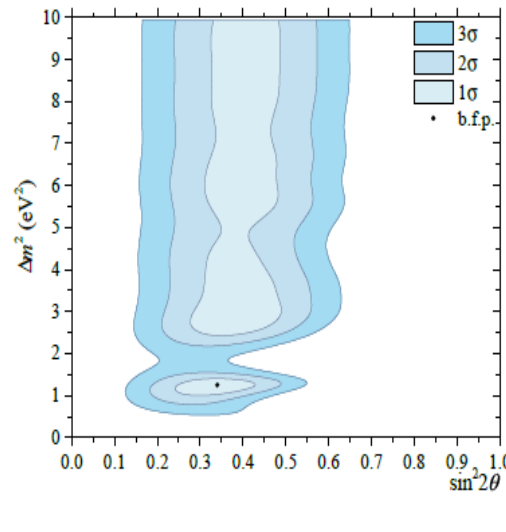
В.В.Горбачёв от лабораторий ГГНТ БНО и РХДМ  
ОЛВЭНА ИЯИ РАН

# Результаты всех Ga экспериментов с источниками

		R	$\sigma$
1	SAGE – Cr	0.95	0.12
2	SAGE – Ar	0.79	0.095 (+0.09 -0.10)
3	GALLEX – Cr1	0.953	0.11
4	GALLEX – Cr2	0.812	0.11
5	BEST – in	0.766	0.05
6	BEST – out	0.791	0.05



BF для 2 BEST измерений:  
 $\Delta m^2 = 3.3 \text{ эВ}^2$  и  $\sin^2(2\theta) = 0.42$



BF для (2 BEST + 2 SAGE + 2  
 GALLEX):  
 $\Delta m^2 = 1.25 \text{ эВ}^2$  и  $\sin^2(2\theta) = 0.34$

Суммарный результат  $R_0 \pm \sigma_0 = 0.80 \pm 0.05$  (5.7%)

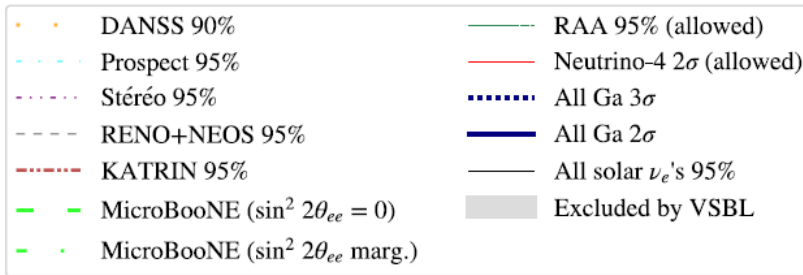
Га аномалия подтверждена на уровне  $> 4\sigma$

Гипотеза стерильных нейтрино остаётся актуальной

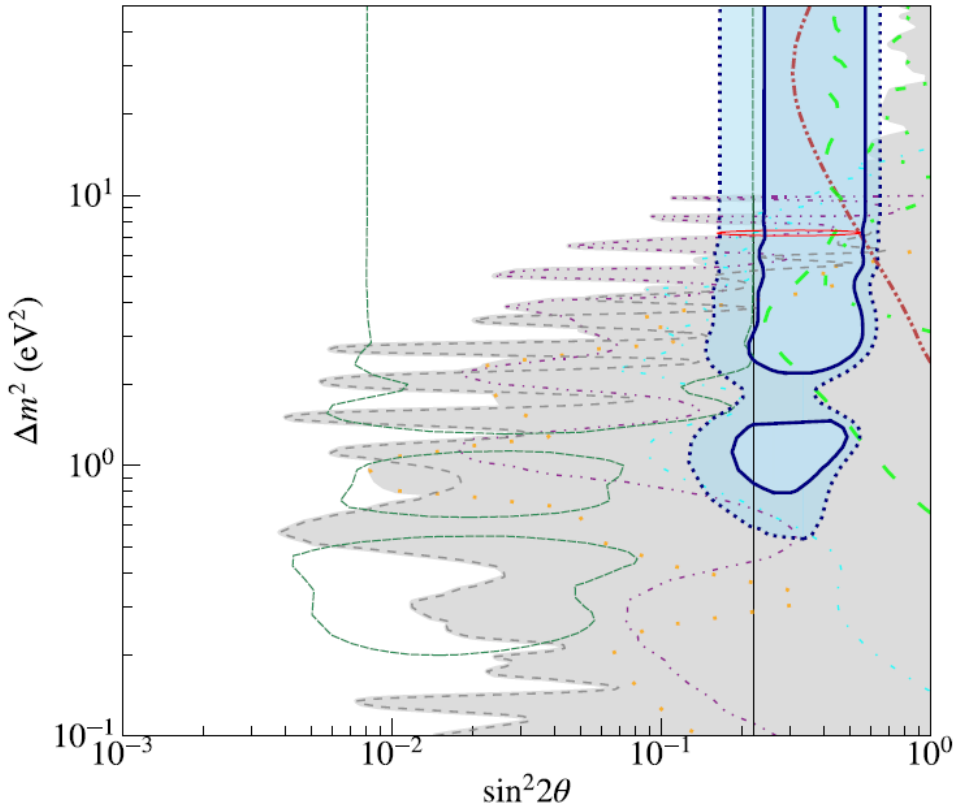
Определён параметр  $\sin^2 2\theta = 0.42 \pm 0.16$

Параметр  $\Delta m^2$  остаётся неизвестным ( $> 1 \text{ эВ}^2$ )

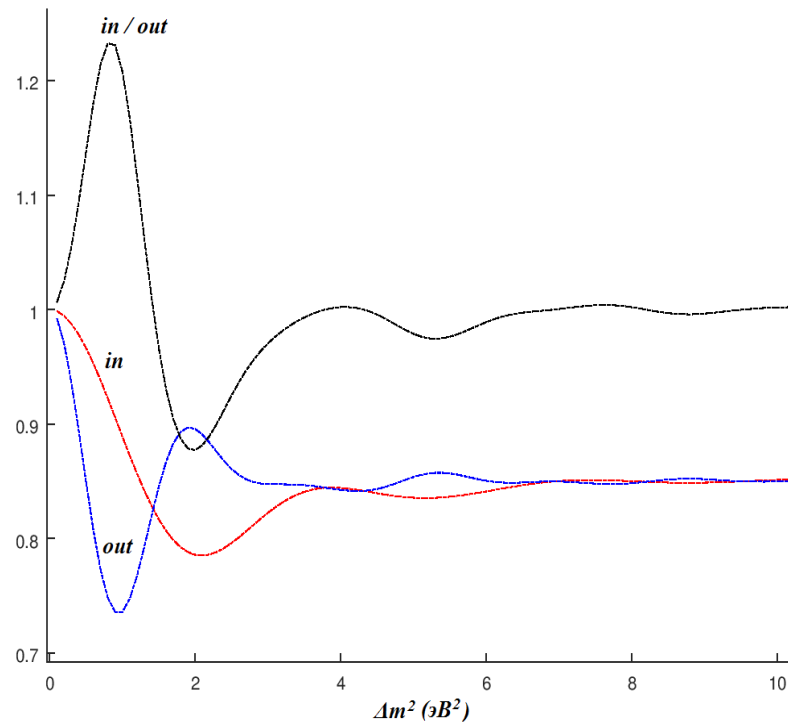
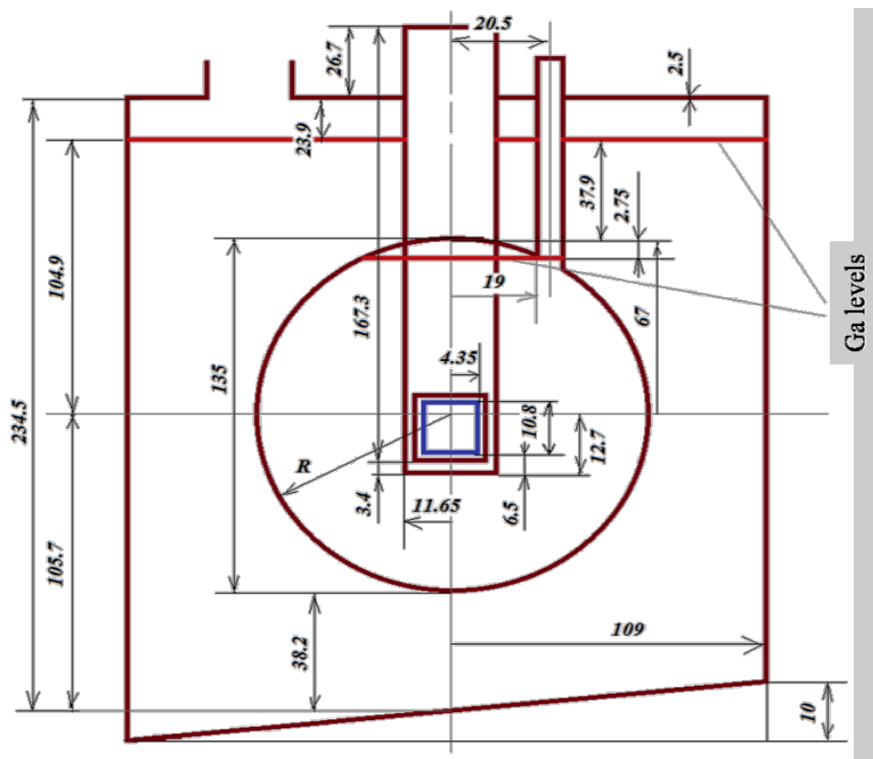
# Ограничения на допустимые параметры нейтринных осцилляций



$$P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m^2 (\text{eV}^2) \cdot L(m)}{E_\nu (\text{MeV})} \right)$$



Источник  $^{51}\text{Cr}$ , 3.4 МКи



$$V_{\text{in}} = 1.2 \text{ м}^3, \quad M_{\text{in}} = 7.5 \text{ т}$$

$$V_{\text{out}} = 6.6 \text{ м}^3, \quad M_{\text{out}} = 40.0 \text{ т}$$

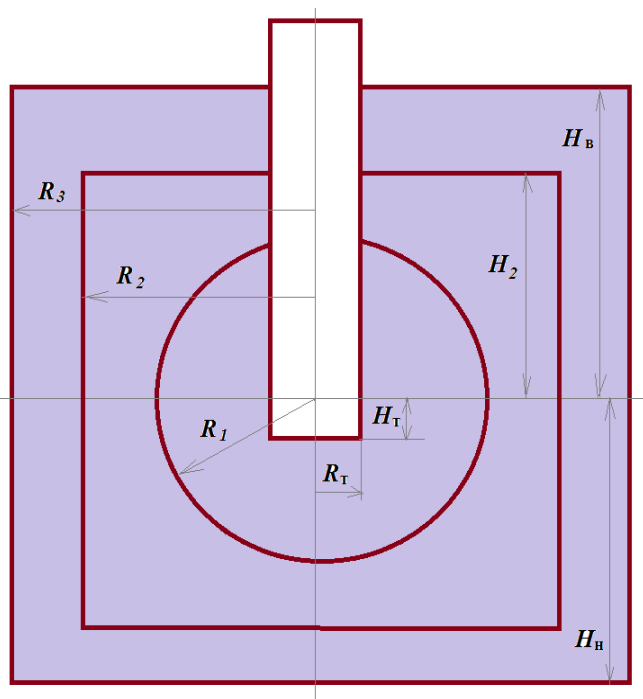
$$\langle L_{\text{in}} \rangle = 52.03 \pm 0.18 \text{ см}$$

$$\langle L_{\text{out}} \rangle = 54.41 \pm 0.18 \text{ см}$$

Независимые измерения в 2 зонах на 2 расстояниях

## Новый Ga эксперимент BEST-2

Основная цель – измерение параметра  $\Delta m^2$  в гипотезе стерильных осцилляций

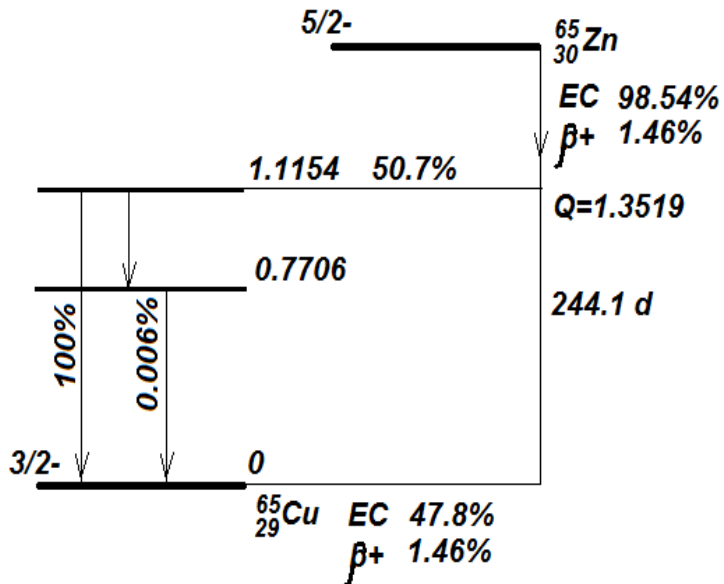


1) Увеличиваем число зон мишени, добавляем информацию о расстоянии  $L$ :  
делим внешнюю, цилиндрическую зону BEST на 2 части равной толщины цилиндрической вставкой

2) Меняем источник:  
вместо  $^{51}\text{Cr}$  используем  $^{65}\text{Zn}$   
энергия нейтрино увеличивается в  
( $1.35 \text{ МэВ} / 0.75 \text{ МэВ} =$ ) 1.8 раза

Активность источника подбираем так, чтобы суммарная статистика по всем зонам была равна суммарной статистике BEST

## Источник $^{65}\text{Zn}$



Излучает  $\nu_e$  с энергиями 1.35 МэВ, 48.35% и  
0.236 МэВ, 51.6%

Активность источника подбираем так, чтобы суммарная статистика по всем зонам была равна суммарной статистике BEST

Источник изготавливаем облучением цинка, обогащённого по изотопу  $^{64}\text{Zn}$ , в форме металла или  $\text{ZnO}$  тепловыми нейтронами в ядерном реакторе

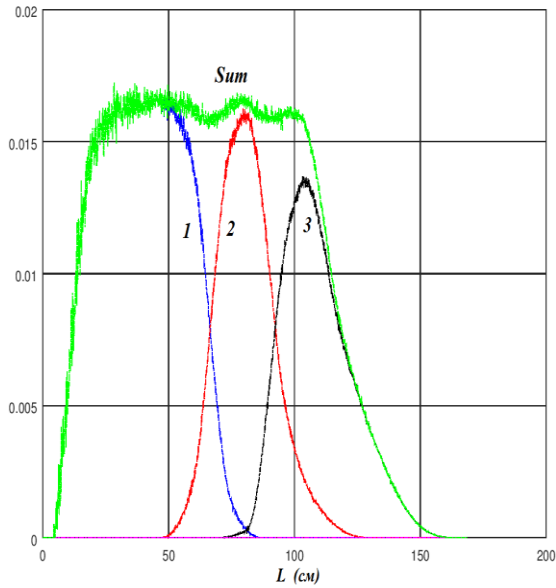
$^{64}\text{Zn}$ : природное содержание 48.6%  
сечение захвата тепловых нейтронов 0.787 б

$\gamma$  излучение: 1350 кэВ, 50.7%  
- нужна защита для персонала

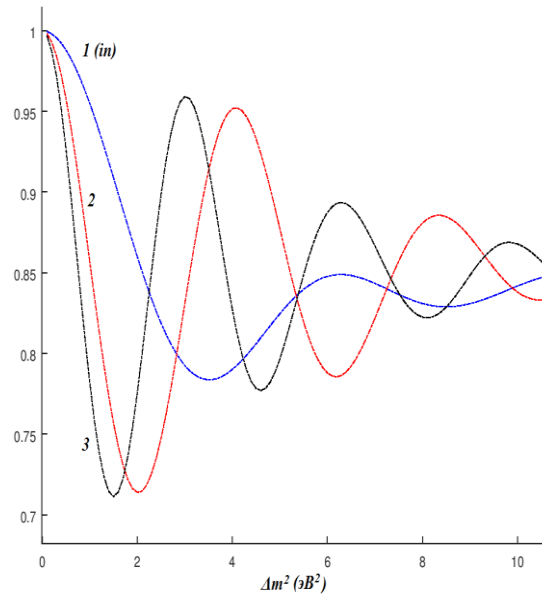
Можно ожидать изготовление источника активностью  $\sim 0.5$  МКи

В 2018 году возможность изготовления такого источника исследовалась для реакторов МИР (АО ГНЦ НИИАР), ИВВ-2М (АО ИРМ) и Л-2 (ФГУП ПО Маяк)

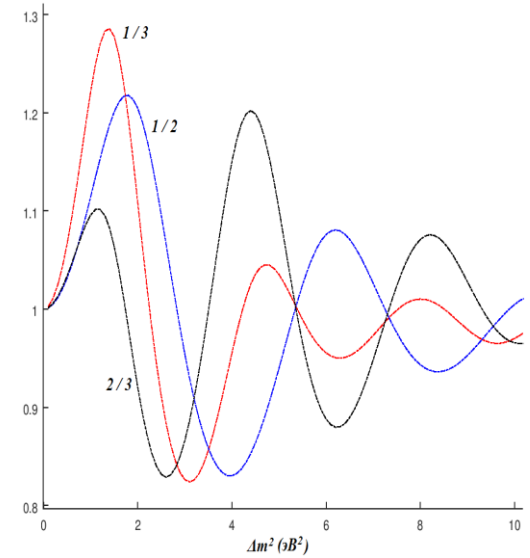
# BEST-2



Зависимости  
относительного  
количества Ga в зонах  
мишени от расстояния

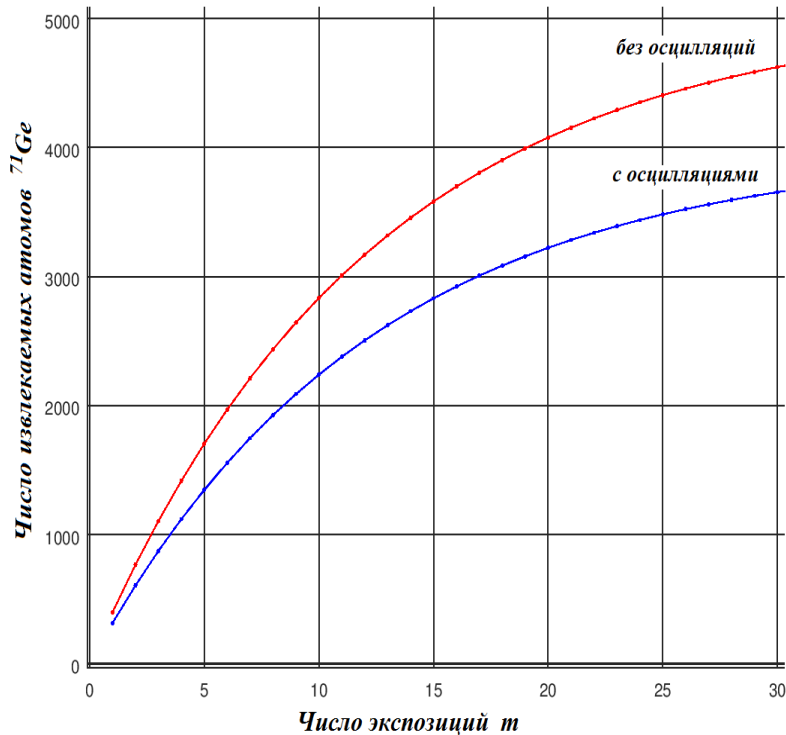


Скорости захвата в зонах  
мишени для  $\sin^2 2\theta = 0.30$



Отношение скоростей  
захвата в зонах мишени

## Статистика событий в BEST-2



Зависимость числа извлекаемых атомов  $^{71}\text{Ge}$  для источника 0.5 МКи для  $\nu_0 = 32.1$  захват/сут во всей мишени

$t_1 = 28$  сут – время 1 облучения

$t_2 = 1$  сут – время между облучениями

Статистика BEST – 2800 событий в обеих зонах мишени

Без осцилляций статистика BEST достигается за  $m = 10$  облучений;

С осцилляциями ( $\sin^2 2\theta = 0.42$ ) за  $m = 14$  облучений

Через  $m=10$  облучений активность упадёт до 44%, до 0.22 МКи

(для  $^{51}\text{Cr}$  через  $m=10$  облучений активность упала до 8%, до 0.27 МКи)



## *Разделение мишени на зоны*

Толщина в зонах будет:  $\langle L \rangle = 52, 27, 27$  см

Статистика в 1-й зоне равна статистике в 1 зоне BEST, во 2-й и 3-й – в 2 раза меньше

№ зоны	R, см	V, м <sup>3</sup>	Масса, т	$\nu_C$ , сут <sup>-1</sup>	$N_C$ (28 сут)	$N_C$ (10 сут)
1	67	1.2	7.5	0.15	2.1	1.1
2	84	2.4	14.7	0.29	4.0	2.0
3	109	4.4	26.8	0.54	7.2	3.7

$N_C$  – число атомов <sup>71</sup>Ge от солнечных нейтрино за 1 облучение длительностью 28 сут (Zn) и 10 сут (Cr)

## *Статистика и ошибки*

Допускаем:

$N_{source} = 700$  – полное число регистрируемых импульсов от источника в 1-й зоне мишени  
(как в BEST)

эффективность регистрации  $\varepsilon = 0.50$  (обычно  $\sim 0.53$ )

$\alpha = 1.3$  (из BEST, обычно  $\alpha < 1.3$ , т.е. можно ожидать, что ошибки будут меньше)

Ожидаемая скорость захвата во всей мишени от источника 0.5 МКи 31.2  $\nu_e$  / сут

В 14-м облучении в зонах 2 и 3 можно ожидать  $\sim 18$  регистрируемых распадов  $^{71}\text{Ge}$

Основная коррелированная ошибка в BEST – ошибка сечения  $\sigma_{cs}$

В BEST-2 для источника  $^{65}\text{Zn}$   $\delta_{cs} = 2.3\%$

Систематические ошибки ожидаем на уровне ошибок в BEST +2.9 / -2.7 %

## Области чувствительности к параметру осцилляций $\Delta m^2$

Область чувствительности:

для каждого задаваемого значения  $\Delta m^2$  определяемое значение  $\Delta m^2$  не превышает некоторого значения – здесь  $20 \text{ эВ}^2$  – и области допустимых значений осцилляций либо локализуется в компактной окрестности

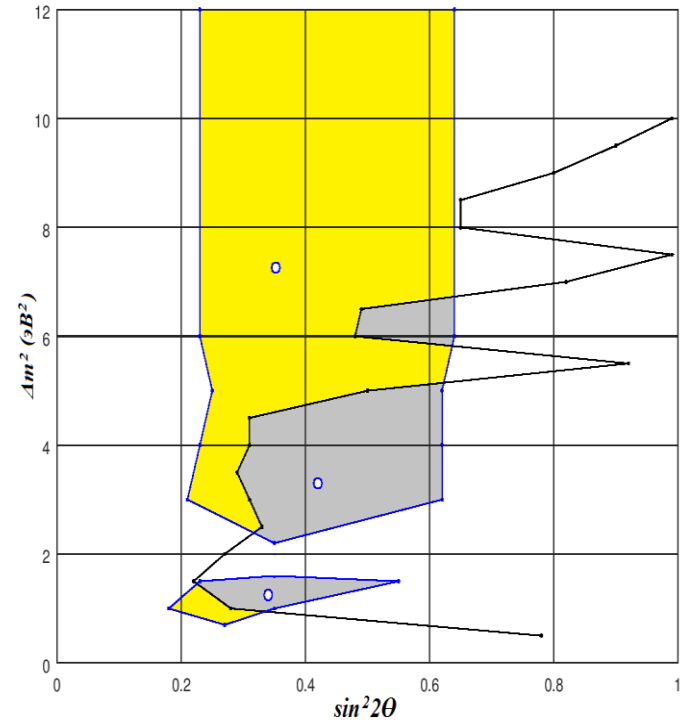
На рисунке:

Жёлтая область – область допустимых параметров для BEST, 90% CL

Зигзаг-кривая – граница области чувствительности для 3-х зонной мишени BEST-2

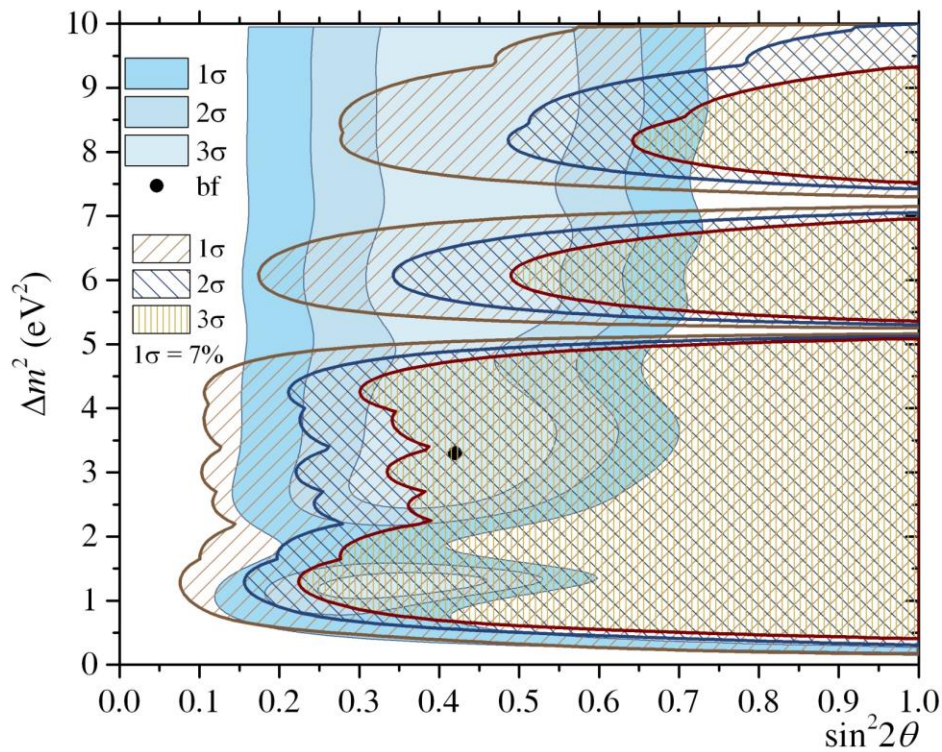
Приведены BF значения BEST, BEST+SAGE+GALLEX и Нейтрино-4:

$$\begin{aligned}(\Delta m^2, \sin^2 2\theta) &= (3.3 \text{ эВ}^2, 0.42) \\ &= (1.25 \text{ эВ}^2, 0.34) \\ &= (7.3 \text{ эВ}^2, 0.36)\end{aligned}$$



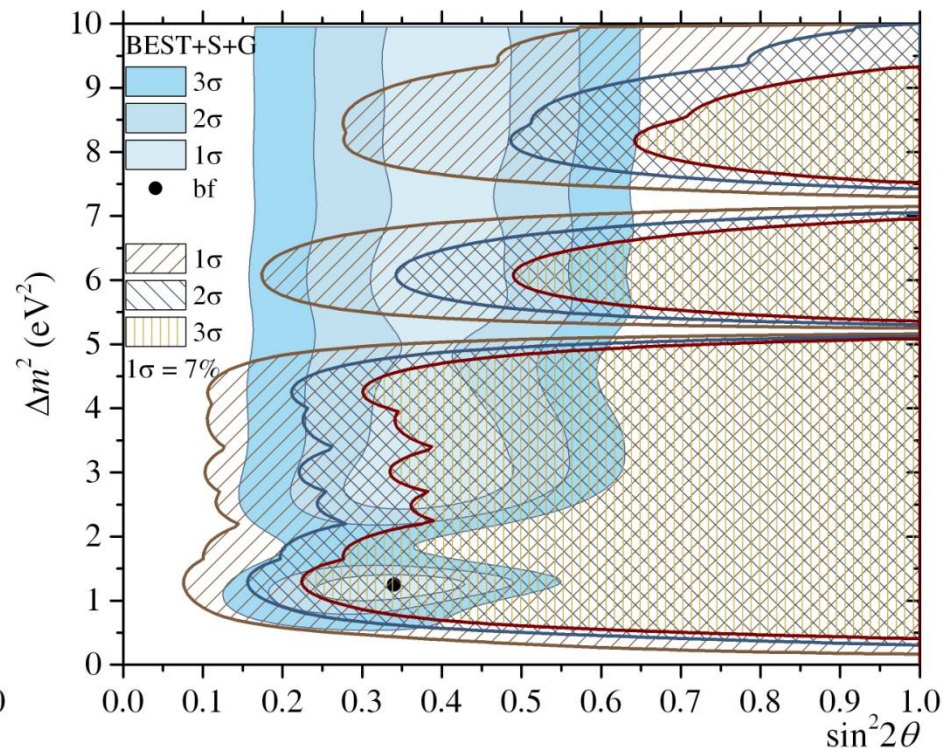
# Области чувствительности к параметру осцилляций $\Delta m^2$

Чувствительность BEST-2 в области  
результатов BEST

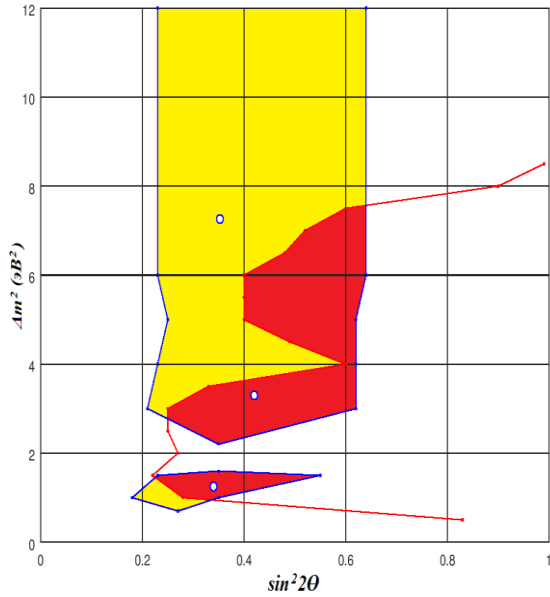


(7.3 эВ<sup>2</sup>, 0.36)

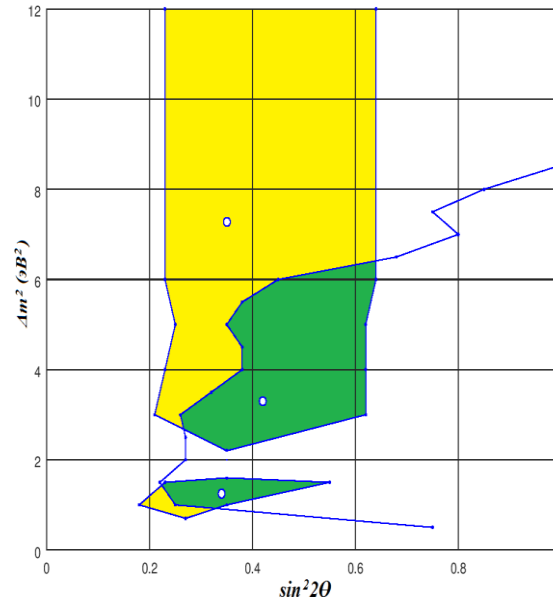
Чувствительность BEST-2 в области  
результатов BEST + SAGE(Cr+Ar) +  
GALLEX(Cr1+Cr2)



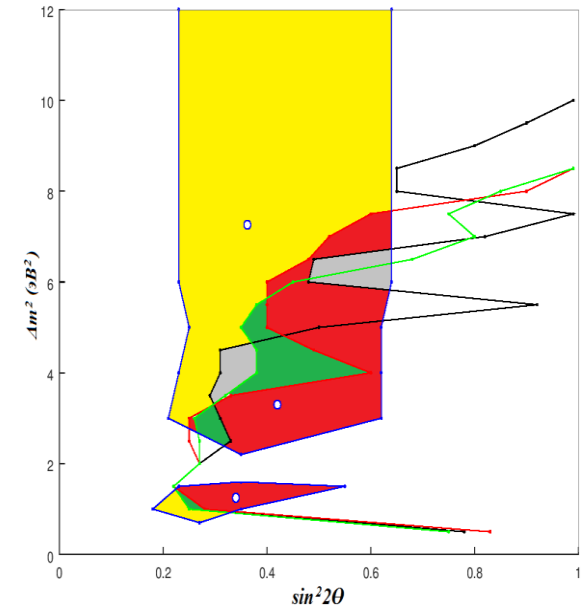
## Области чувствительности к параметру для разной геометрии зон мишени



3-зонная мишень с  
одинаковой толщиной всех  
зон; все зоны  
цилиндрические



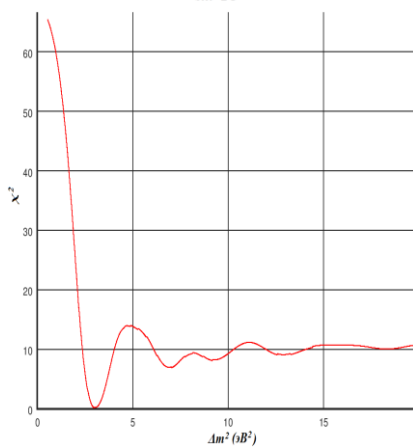
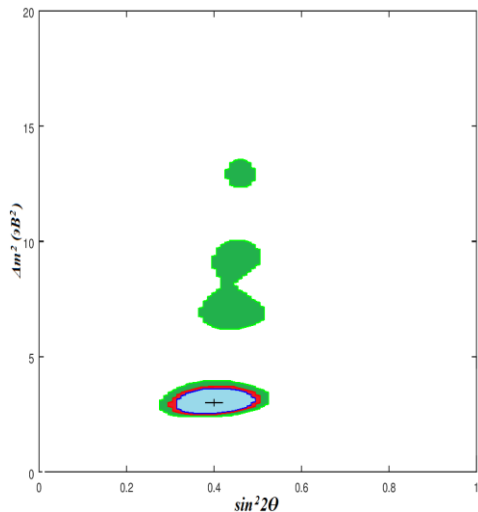
4-зонная мишень с  
одинаковой толщиной всех  
зон; все зоны  
цилиндрические



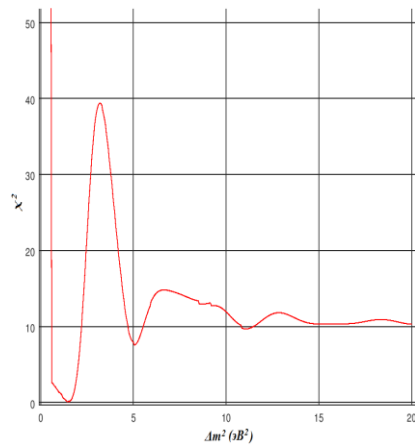
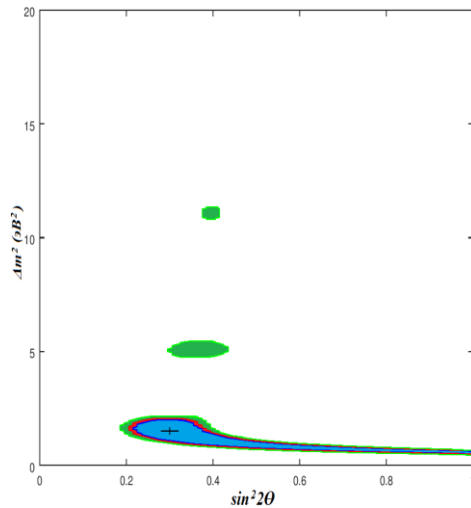
Суммарно по всем  
геометриям

Т.е. в любой геометрии до  $\Delta m^2 \sim 3.5 \text{ эВ}^2$  чувствительность одинаковая  
BF эксперимента BEST находятся в области чувствительности  
BF Нейтрино-4 в область чувствительности не попадает

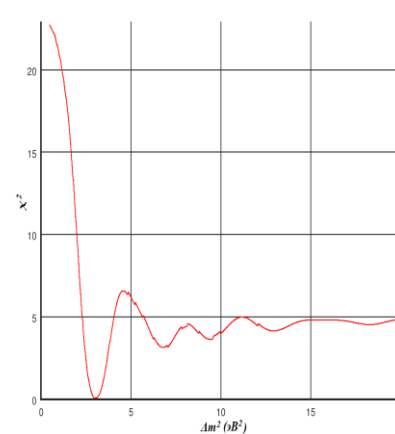
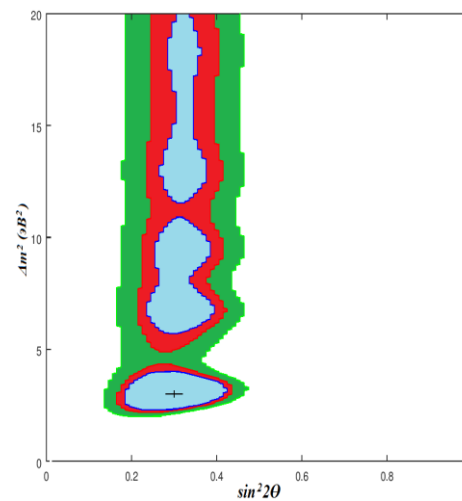
## Примеры реализаций



$(\Delta m^2, \sin^2 2\theta) = (3.0 \text{ эВ}^2, 0.40)$



$(1.5 \text{ эВ}^2, 0.30)$



$(3.0 \text{ эВ}^2, 0.30)$

Показаны  
области  
с CL 90, 95 и  
99%

$\Delta\chi^2 = 4.61, 5.99$   
и  
9.21  
для dof = 2

Считаем, что в первых двух реализациях параметры определяются, в третьей – нет

## *Заключение*

Эксперимент BEST-2 на 3-х зонной Ga мишени с источником  $^{65}\text{Zn}$  активностью 0.5 МКи будет эффективным инструментом для проверки гипотезы стерильных осцилляций в области  $\Delta m^2$  до  $\sim 10 \text{ эВ}^2$  с определением параметра  $\Delta m^2$  в диапазоне 0.5 – 5-6  $\text{эВ}^2$  при амплитудах  $\sin^2 2\theta > 0.30$

Чувствительность к определению параметров возрастает по сравнению с BEST использованием источника с большей энергией нейтрино и делением мишени на большее число зон на разных расстояниях от источника

Отсутствие необходимости определения энергии нейтрино делает BEST-2 одним из самых чувствительных инструментов в мире для определения параметра  $\Delta m^2$  в области диапазона чувствительности

Участники эксперимента – сотрудники лабораторий ГГНТ БНО и РХДМ ОЛВЭНА  
Мы надеемся, что в эксперименте также примут участие наши коллеги из США, которые внесли большой вклад в эксперимент BEST  
При необходимости могут присоединяться другие участники  
Эксперимент мы предполагаем сделать за 3 года