

Московский государственный университет

им.М.В.Ломоносова

Физический факультет

Курсовая работа

Оценка перспектив поиска стерильных нейтрино на
сверхкороткой базе Баксанского галлий - германиевого
нейтринного телескопа

Научный руководитель: д.ф.-м.н., с.н.с. Горбунов Д. С.

Выполнил: студент 210 группы Баринов В. В.

Москва 2015

Аннотация

Открытие нейтринных осцилляций (превращения нейтрино одного сорта в нейтрино другого сорта) является одной из важнейших проблем современной физики частиц. В первую очередь, наличие осцилляционных переходов указывает на неполноту Стандартной модели физики частиц, в частности, её нейтринного сектора. Открытие осцилляций стало решением проблемы солнечных нейтрино и дальнейшее изучение осцилляций может пролить свет на некоторые фундаментальные вопросы рождения и эволюции Вселенной, так как многие проблемы можно объяснить модификацией всего лишь одного нейтринного сектора. Изучению осцилляционных переходов нейтрино одного сорта в нейтрино другого сорта (так называемые стерильные нейтрино) на очень коротких дистанциях и исследованию их параметров на базе галлий - германиевого нейтринного телескопа в эксперименте BEST и посвящена данная работа.

1 Проблема осцилляций нейтрино

Достаточно долгое время все экспериментальные данные по изучению свойств нейтрино согласовывались со схемой с тремя активными нейтрино [1]. Однако, эксперимент LSND [2] заявил об обнаружении осцилляций между мюонными и электронными антинейтрино. Результаты этого эксперимента давали немалый угол смешивания и разницу квадратов масс собственных состояний нейтрино $\Delta m^2 \sim 1(eV^2)$ [3]. Данные, которые были получены, не могли быть объяснены в рамках стандартной схемы трёх нейтрино. Этот факт говорил о том, что требуется введение еще как минимум одной частицы (легкое стерильное нейтрино). После этого было проведено множество экспериментов по поиску осцилляций нейтрино. И в ряде экспериментов были также получены аномальные результаты, согласующиеся с осцилляционными параметрами, полученными в эксперименте LSND.

В последнее время интерес к проблеме осцилляционных переходов получил новое развитие, в первую очередь, это связано с результатами эксперимента MiniBooNe [4], где исследовались осцилляции $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$, и были получены данные, согласующиеся с LSND. Так же были пересмотрены оценки потоков реакторных антинейтрино и результаты соответствующих реакторных экспериментов стали явно указывать на дефицит регистрируемых нейтрино, а это в свою очередь поддерживает гипотезу о том, что имеют место быть осцилляции $\bar{\nu}_e$ в нейтрино с массой $m \sim 1eV$. Обобщенный анализ всей совокупности имеющихся у нас экспериментальных данных указывает, что есть возможность объяснить полученные результаты, если допустить существование двух стерильных нейтрино с массами $\sim 0.5 eV$. Подобная физика может быть ответственна и за результаты калибровочных экспериментов SAGE [5] и GALLEX [6], проводившихся с искусственными источниками нейтрино.

Основываясь на том, что было сказано выше, становится очевидной важность экспериментальной проверки гипотезы об осцилляциях нейтрино в стерильные состояния с массами порядка $\sim 1eV$. Причиной такого большого внимания к обнаруженному эффекту является фундаментальная значимость проблемы нейтринного сектора.

2 Обзор Ga экспериментов с источниками нейтрино

Эксперименты на основе изотопа галлия имеют очень высокую чувствительность к низкоэнергетическим нейтрино [7]. Дело в том, что для поглощения нейтрино изотопом галлия и образования радиоактивного германия $^{71}Ga + \nu_e \rightarrow ^{71}Ge + e^-$ пороговое значение энергии для протекания реакции должно быть всего около 0.233 (MeV) [8]. Это сразу делает галлиевые детекторы чувствительными к регистрации солнечных нейтрино. А это особенно важно, так как основную долю нейтрино от Солнца мы получаем благодаря pp реакции: $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$.

Галлиевый эксперимент GALLEX по измерению величины скорости захвата солнечных нейтрино на галлии проводился при международном сотрудничестве ученых более чем из 6 стран в период с 1991 по 1997 год. Ожидаемая скорость счета нейтринных событий по CCM составляет 130 ± 8 SNU, а измеренная оказалась: $77.5 \pm 6.2 \pm 4.5$ SNU [8]. После некоторого перерыва эксперимент был продолжен с новым названием GNO, в котором с мая 1998 года по апрель 2003 года была измерена величина скорости захвата: 62.9 ± 5.1 SNU.

Эксперимент SAGE был создан для измерения величины скорости захвата солнечных нейтрино в реакции $^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow ^{71}\text{Ge} + e^-$, с целью получения информации для решения проблемы дефицита нейтрино, обнаруженного в ^{37}Cl эксперименте, в котором было зарегистрировано лишь около одной трети величины скорости захвата, предсказываемой Стандартной Солнечной Моделью [9]. Полученные с 1990 года результаты SAGE впервые показали наличие дефицита солнечных нейтрино во всем диапазоне энергий регистрируемых нейтрино [10]. Результат измерений скорости захвата нейтрино на ядрах ^{71}Ga в эксперименте SAGE за период с 1990 года по 2011 года составляет: $65.4 \pm 2.7 \pm 2.7$ SNU [11].

Запросив подробные данные о проведении экспериментов SAGE и GALLEX, была получена следующая крайне важная информация:

В эксперименте SAGE около 25% мишени облучалось источниками на основе изотопов ^{51}Cr и ^{37}Ar . В эксперименте GALLEX дважды использовался источник на основе изотопа ^{51}Cr для облучения всей мишени. Оба источника испускают практически моноэнергетические нейтрино с энергией близкой к энергии солнечных ^7Be нейтрино: 0.75 MeV для ^{51}Cr и 0.81 MeV для ^{37}Ar . В отличие от солнечных измерений скорость взаимодействия нейтрино от источников пропорциональна плотности мишени. В эксперименте SAGE мишень в форме металлического Ga, плотность которого значительно выше, чем в эксперименте GALLEX, у которого мишенью является раствор хлорида Ga в соляной кислоте. Поэтому, хотя активности источников отличались в 3-4 раза и масса мишени в 2.3 раза, статистические неопределенности экспериментов имеют близкие значения. Средневзвешенное значение результатов четырех экспериментов R, выраженное как отношение измеренной скорости образования ^{71}Ge к ожидаемой, полученной из измеренной активности источника и известного сечения захвата нейтрино на Ga, $R = 0.87 \pm 0.05$, более чем на два стандартных отклонения меньше единицы [12].

Результаты четырех Ga экспериментов с искусственными источниками нейтрино. p - измеренная скорость образования ^{71}Ge от источников. R - отношение измеренной скорости образования к ожидаемой скорости образования в отсутствие осцилляций.

	SAGE ^{51}Cr	SAGE ^{37}Ar	GALLEX Cr1	GALLEX Cr2
Активность, кКи	516.6±6.0	409±2	1714 ⁺³⁰ ₋₄₃	1868 ⁺⁸⁹ ₋₅₇
$p_{\text{изм}}$, атомов ^{71}Ge /сут	14.0±1.5±0.8	11.0 ^{+1.0} _{-0.9} ±0.6	11.9±1.1±0.7	10.7±1.2±0.7
Масса Ga (г)	13.1 (метал.)	13.1 (метал.)	30.4 (GaCl ₃ :HCl)	30.4 (GaCl ₃ :HCl)
$R=p_{\text{изм}}/p_{\text{теор.}}$	0.95±0.12	0.79±0.10	0.953±0.11	0.812±0.11

Таким образом, причиной дефицита нейтрино в калибровочных Ga экспериментах может быть статистическая флуктуация, вероятность которой мала, около 5% или реальный физический эффект, возможно, переход активных нейтрино в стерильные состояния на очень коротких расстояниях с большими Δm^2 [13]

3 Проект BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions)

Эксперимент BEST предлагает новый подход к исследованию осцилляций нейтрино. Идея проекта состоит в изучении осцилляционных переходов на основе двухзонной галлиевой мишени посредством облучения рабочего вещества ^{71}Ga источником нейтрино ^{51}Cr с активностью 3МКи [14], схема распада которого представлена на рис. 1.

Установка нейтринного телескопа в проекте BEST представляет собой сферу, заполненную жидким галлием и помещенную внутрь цилиндрической емкости, так же

заполненную жидким галлием, которые облучаются источником ^{51}Cr , помещенным в центре сферы. Сфера - это первая мишень или первая зона, а цилиндрическая емкость соответственно вторая мишень или вторая зона.

Параметры каждой из зон: $r_1 = 660(mm)$ - радиус сферической емкости, $r_2 = 1096(mm)$ - радиус цилиндрической емкости (цилиндр имеет равную высоту и ширину). Если быть более точным, то вторая зона представляет собой цилиндр не с плоским, а выгнутым эллиптическим дном. Но как указано в проекте эксперимента, изменение формы внешней зоны мишени со сферической на цилиндрическую приводит к изменению темпа счета в отсутствие осцилляций на 2 %, что незначимым образом сказывается на чувствительности к осцилляциям (это будет показано далее).

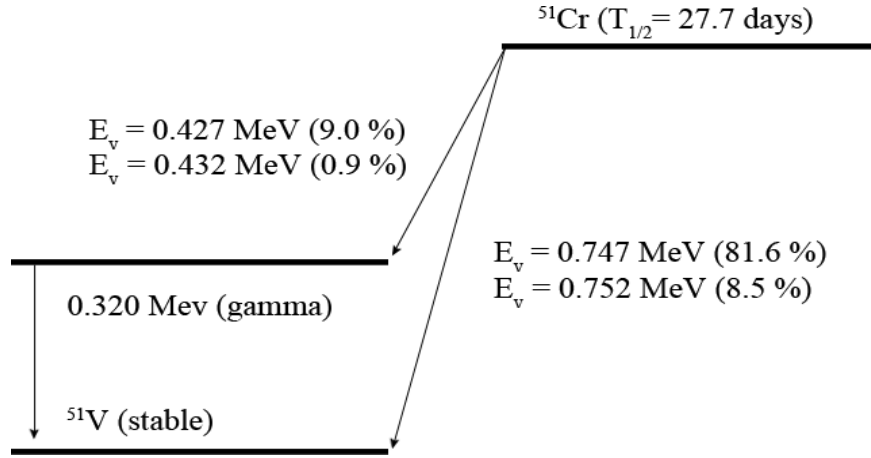


Рис. 1: Схема распада ^{51}Cr .

В данном эксперименте мы исследуются переходы в стерильные нейтрино с разностью квадратов масс $\Delta m^2 \sim 0.5(eV^2)$ и квадратом синуса угла смешивания $\sin^2(2\theta) > 0.1$. Чувствительность эксперимента к осцилляциям составляет 4.8%, что позволяет ограничить значительную область параметров осцилляций [15].

4 Перспективы поиска нейтрино в эксперименте BEST

В данном разделе будут изложены основные итоги работы, посвященные исследованию параметров осцилляций нейтрино в эксперименте BEST.

Согласно теории, вероятность осцилляций электронных нейтрино в нейтрино другого сорта описывается следующей функцией:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_s} = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m^2 (eV^2) L(m)}{E(MeV)}\right) \quad (1)$$

Соответственно вероятность выживания:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m^2 (eV^2) L(m)}{E(MeV)}\right) \quad (2)$$

Где: Δm^2 - разность квадратов масс собственных состояний нейтрино, $\sin^2(2\theta)$ - квадрат синуса угла смешивания состояний нейтрино, E - энергия нейтрино, L - длина базы

(расстояние, которое пролетела частица от источника до детектора). В нашей работе мы используем схему с одним дополнительным нейтрино и следовательно рассматриваем случай осцилляций между двумя типами нейтрино.

Наша главная задача - это построение областей исключения параметров осцилляций для проекта BEST. И несмотря на поправку в 2%, обусловленную геометрией мишени, мы можем пользоваться упрощенной моделью (вторая зона - сфера), так как нас интересует некая область параметров $\Delta m^2(\sin^2(2\theta))$, а не конкретная изолиния. Но разумеется в работе будет предоставлен и строгий расчет, что даст нам возможность сравнить данные.

Для ясности скажем, что подобная геометрия детектора выбрана не случайно. Как мы можем видеть, вероятность перехода электронного нейтрино в стерильные состояния (в модели с одним дополнительным нейтрино) описывается функцией (1), которая зависит от длины базы. Поскольку первая и вторая зоны находятся на разных расстояниях от источника и мы точно знаем спектр испускаемых им нейтрино, то представленный в проекте детектор чувствителен к исследуемому нами типу осцилляций.

Перейдем к вопросу о вероятности взаимодействия электронных нейтрино с мишенью. Эта вероятность равна отношению измеренной скорости захвата частиц, к ожидаемой скорости захвата в отсутствии осцилляций. Для расчета измеренной скорости захвата частиц к ожидаемой в первой зоне была использована следующая формула:

$$R_1 = \frac{\int_{0.1}^{0.66} (1 - \sin^2(2\theta) \sin^2(1.27 \frac{\Delta m^2 r}{E_{0.75(MeV)}})) 0.96 dr + \int_{0.1}^{0.66} (1 - \sin^2(2\theta) \sin^2(1.27 \frac{\Delta m^2 r}{E_{0.43(MeV)}})) 0.04 dr}{\Delta L} \quad (3)$$

Где: R_1 - отношение измеренной скорости захвата частиц к ожидаемой, для первой зоны. $E_{0.75(MeV)}$, $E_{0.43(MeV)}$ - средние значения энергий испускаемых нейтрино (96% захватов на галлии происходит от нейтрино энергии 0.75(MeV) (Так указано в данных проекта), r - длина базы (в пределах мы учли радиус емкости с источником $\sim 100(mm)$), ΔL - разница между радиусом емкости для источника и радиусом сферы.

Сразу скажем, что здесь не содержится интегрирования по цилиндрическому каналу для ввода и размещения источника в центре сферы, так как это не вносит значительных изменений в результаты. Так же отметим еще один важный момент: на самом деле, наш источник не является строго монохроматическим (см. рис. 1), а испускает 4 вида нейтрино. При этом 90% как заявлено в проекте, приходится на нейтрино с энергией 0.75 MeV и 10% с энергией 0.43(MeV), 96% захватов на галлии происходит от нейтрино с энергией 0.75(MeV) и лишь 4% с энергией 0.43(MeV) [16]. Эта поправка учтена.

Для второй зоны (R_2) так же был проведен расчет отношения измеренной скорости захвата к ожидаемой. Но отметим, что выражение для (R_2), уже не является таким простым, как для сферической и здесь мы интегрируем не сводя тройной интеграл к одномерному, а разбивая на подзоны.

$$R_{2V_1} = \frac{\iiint_{V_1} ((1 - \sin^2(2\theta) \sin^2(1.27 \frac{\Delta m^2 r}{E_{0.75(MeV)}})) 0.96 + (1 - \sin^2(2\theta) \sin^2(1.27 \frac{\Delta m^2 r}{E_{0.43(MeV)}})) 0.04) \frac{S(r)}{C(r)} dV}{\Delta V} \quad (4)$$

$$R_{2V_2} = \frac{\iiint_{V_2} ((1 - \sin^2(2\theta)\sin^2(1.27 \frac{\Delta m^2 r}{E_{0.75(MeV)}}))0.96 + (1 - \sin^2(2\theta)\sin^2(1.27 \frac{\Delta m^2 r}{E_{0.43(MeV)}}))0.04) \frac{S(r)}{C(r)} dV}{\Delta V} \quad (5)$$

$$R_2 = R_{2V_1} + R_{2V_2} \quad (6)$$

Где: $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ - расстояние от первой до второй зоны, V_1, V_2 - две подзоны, на которые был разбит интеграл, ΔV - объем второй зоны, $S(r)$ - площадь пересечения первой зоны со второй, $C(r)$ - площадь второй зоны.

Для пояснения того, как производился обсчет цилиндра, скажем: эта зона была разбита на две подзоны: V_1 - область цилиндра, которая представляет собой объемное кольцо, где внутренний радиус равен радиусу первой зоны, V_2 - цилиндр с радиусом основания равным первой зоне(сфере) и высотой равной высоте исходного цилиндра, середину которого вырезает врезанная в него первая зона. Такое разбиение для интегрирования оказалось наиболее удобно использовать при численных расчетах.

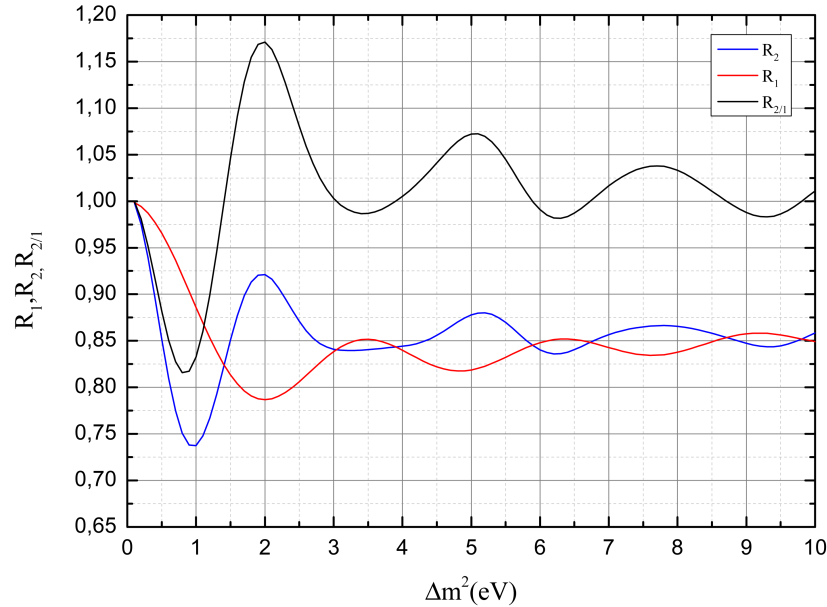


Рис. 2: Результаты расчетов R_1 и R_2 и их отношения $\frac{R_2}{R_1}$ в зависимости от Δm^2 при $\sin^2(2\theta) = 0.3$.

Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с тем, что представлено в проекте. Особенно хорошо представлен график для первой зоны. График для второй зоны имеет чуть большее поднятие, чем представленный в проекте, в областях $\Delta m^2 = 2eV^2$, $\Delta m^2 = 5eV^2$, $\Delta m^2 = 8eV^2$. Но в целом, общее поведение кривых и их принципиальные точки соответствуют предоставленным нам данным. На основании этих результатов мы можем заключить, что использовали принципиально верные представления о геометрии мишени и наша расчетная модель согласуется с тем, что было получено в проекте [17]. Это дает нам возможность оценить области исключения параметров осцилляций для каждой отдельной зоны и их объединения.

Если эксперимент не обнаружит осцилляций в области интересующих нас параметров, тогда с 95% долей вероятности мы сможем исключить значительную область.

4.1 Области исключения параметров осцилляций

Далее мы построим области исключения параметров для каждой зоны по отдельности, сравним их с результатами, предоставленными нам из проекта и построим область для объединения двух зон. Области исключения (закрытия) будут строиться на уровне 2σ (где σ составляет 5% от измеренного результата) - это значит, что с вероятностью 95% значения отношения измеренной скорости захвата к ожидаемой будут лежать в диапазоне от 0.909 до 1.0.

Для построения первой области, была использована следующая формула:

$$1 - R_1 = 2\sigma = 2(R_1 * 0.05) \quad (7)$$

Так было сделано потому, что для построения графиков нас интересует не относительное значение неопределенности (5%), а абсолютное значение ($\sigma = R_1 * 0.05$)

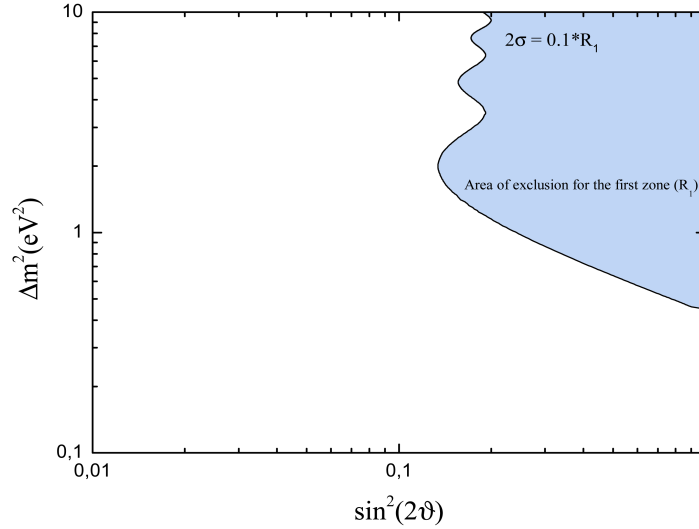


Рис. 3: Область исключения параметров осцилляций для первой зоны R_1 на уровне 2σ .

Для второй зоны был сделан расчет параметров осцилляций как для сферической формы мишени, так и для цилиндрической. Это было сделано для того, чтобы убедиться в том, что замена формы мишени не будет ощутимо сказываться на чувствительности всего эксперимента. Графики для цилиндрической и для сферической формы мишени представлены на рис. 4.

Как мы можем видеть, полученные области для второй зоны в форме сферы и форме цилиндра достаточно похожи, хоть и имеются некоторые отличия. Особенно отличается пропадение в области 2 eV^2 . Но все основные участки графиков отображены в обоих случаях. При наличии каких-либо принципиальных расчетных ошибок или неточностей не удалось бы получить столь согласованные результаты.

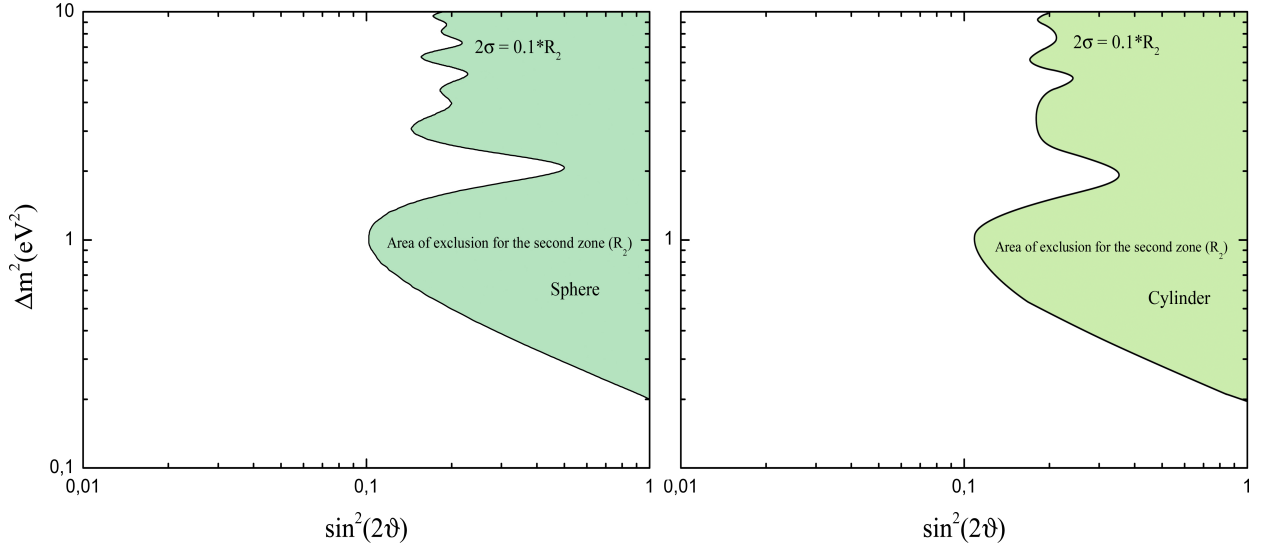


Рис. 4: Области исключения параметров осцилляций для второй зоны R_2 на уровне 2σ , для сферической и цилиндрической геометрии мишени

Ниже мы приводим области исключения, предоставленные нам в частном порядке по запросу из проекта BEST. На первом графике представлена область исключения для первой зоны R_1 (сфера), на втором графике представлена область исключения для второй зоны R_2 (цилиндр).

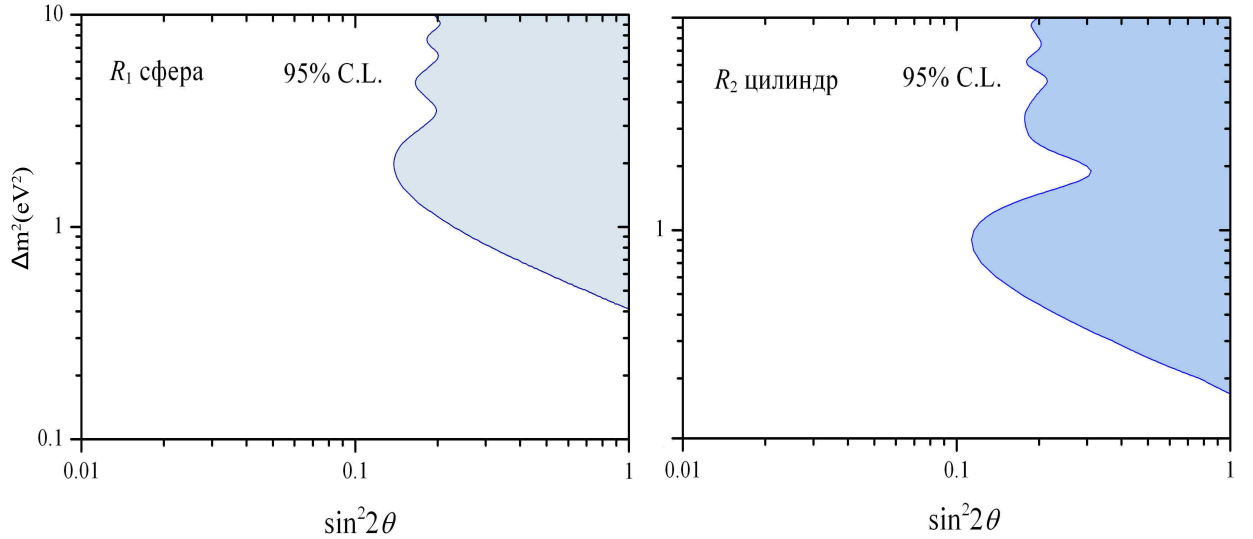


Рис. 5: Области исключения параметров осцилляций для первой R_1 сферической и второй R_2 цилиндрической зоны, полученные по запросу из проекта BEST.

Сравнивая полученный нами график для первой зоны (рис. 3) с графиком предоставленным нам (рис. 5 левый график), мы можем сказать, что результаты двух независимых расчетов хорошо согласуются.

Наши расчеты для второй зоны на основе сферы и на основе цилиндра (рис. 4) так же весьма схожи с тем, что представлено на рис.5 (правый график). Разумеется, расчет по упрощенной (сферической) геометрии мишени для второй зоны отличается

от того, что мы видим на рис.5 (правый график). Но, учитывая тот факт, что отличие в упрощенной модели второй зоны не более 2% , мы можем провести корректный расчет для объединения двух зон, используя сферическое приближение. Однако, это сравнение очень важно, так как теперь мы можем говорить о том, что оценка области исключения может быть осуществлена для упрощенной геометрии мишени. Далее мы приведем так же и строгий расчет.

Для объединения результатов из каждой зоны, мы использовали минимизирующий функционал χ^2 . Поскольку результаты в первой и во второй зоне имеют одинаковый вес [18], и области исключения строятся на уровне достоверности 95%, мы получим следующее выражение:

$$\chi^2 = 6 = \frac{(1 - R_1)^2 + (1 - R_2)^2}{\sigma^2} \quad (8)$$

Стоит пояснить почему здесь стоит 6: Значение χ^2 подобрано таким образом, что оно отвечает уровню достоверности 95% и объединению двух зон, т.е. в распределении "хи-квадрат" с числом степеней свободы $n = 2$ и вероятности ошибки $p \leq 0,05$ (т.е. для 95% уровня достоверности) критическое значение $\chi^2 = 5,99$ (~ 6). Поэтому ищется значение функционала меньше критического значения χ^2 [19].

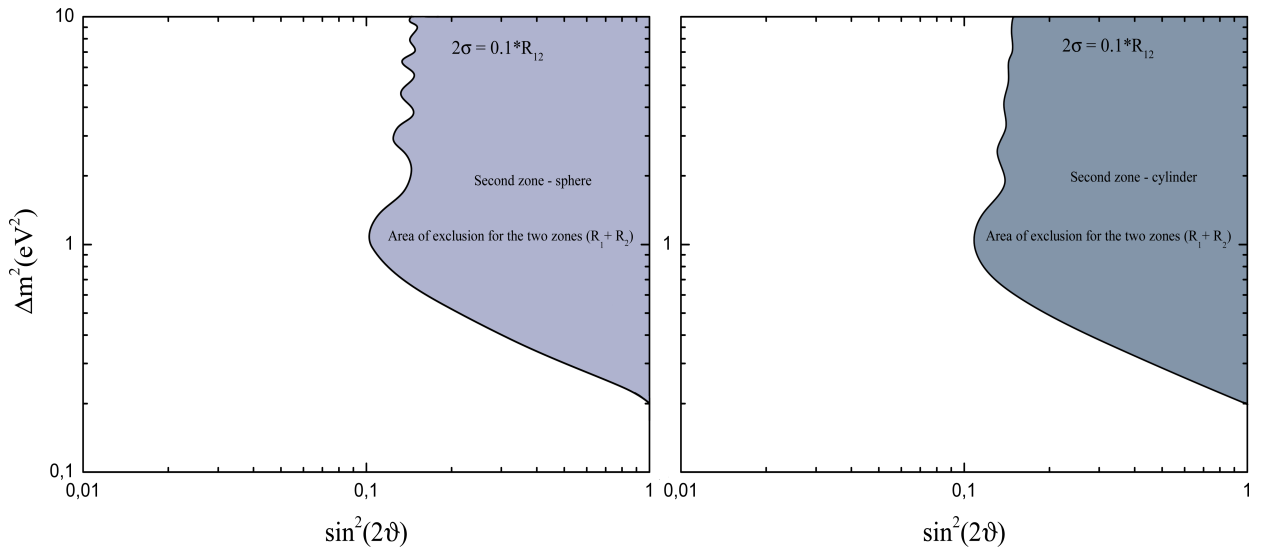


Рис. 6: Области исключения параметров осцилляций для объединения двух зон. На левом графике представлен результат при упрощенной модели второй зоны R_2 , на правом графике представлен результат для цилиндрической формы второй зоны R_2

Как мы можем видеть, данные графики весьма похожи - этого и следовало ожидать. Но заметим, что график, построенный для упрощенной геометрии второй зоны (слева), несколько вырожден в области 1eV^2 , в отличие от графика справа, для которого был произведен более строгий расчет. Тем не менее, результаты в целом достаточно близки к тем, которые были предоставлены нам из коллаборации BEST (рис. 7).

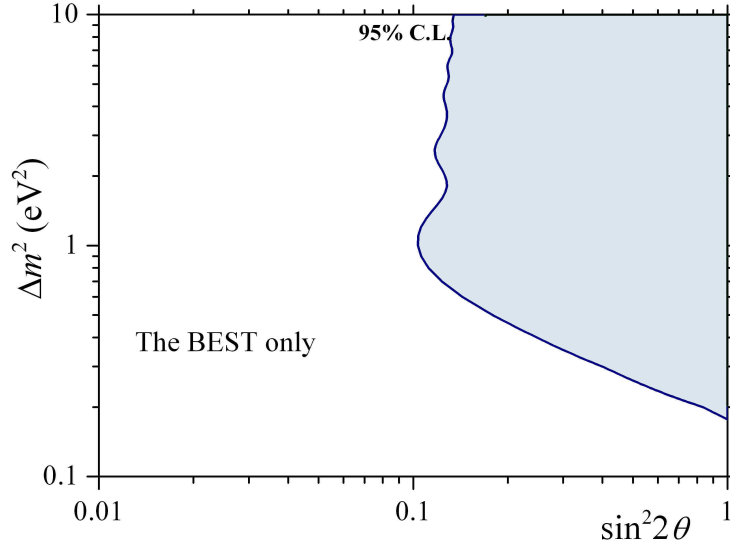


Рис. 7: Области исключения параметров осцилляций для объединения двух зон, представленные нам по запросу из коллаборации BEST. Построение выполнено для уровня достоверности 95%

5 Итоги

В работе был проведен анализ галлиевых экспериментов с искусственными источниками нейтрино, результаты которых послужили поводом для создания проекта BEST. В ходе работы получены зависимости отношения измеренных скоростей захвата к ожидаемым для двух зон нейтринного телескопа. Построены области исключения параметров осцилляций для двух конфигураций внешней мишени, которые достаточно хорошо согласуются с данными представленными в проекте. Показано, какое влияние оказывает изменение геометрии внешней зоны к общей чувствительности эксперимента.

Данные, полученные в ходе работы, при отсутствии статистически значимого отклонения скоростей захвата в обеих зонах, позволят исключить гипотезу о наличии осцилляционных переходов с параметрами $\Delta m^2 \sim 0.5(eV^2)$ и квадратом синуса угла смешивания $\sin^2(2\theta) > 0.1$. В случае обнаружения осцилляций в какой-либо из зон, при заявленных параметрах, будут получены прямые доказательства нестандартных свойств нейтрино. Тем самым, проект открывает значительные перспективы для исследования свойств нейтрино.

Автор выражает огромную благодарность сотрудникам коллаборации BEST
 Руководителю проекта ГГНТ д.ф.-м.н., чл.-кор. Гаврину Владимиру Николаевичу,
 н.с. ЛГГНТ БНО Ибрагимовой Татьяне Викторовне,
 к.ф.-м.н., с.н.с. ЛГГНТ БНО Горбачеву Валерию Владимировичу
 за многочисленные обсуждения и критический анализ текста курсовой работы.

Литература

- [1]. Поиск осцилляционных переходов $\nu_e \longrightarrow \nu_x$ на очень коротких расстояниях с источником нейтрино ^{51}Cr на двойной металлической Ga мишени Баксанского галлий - германиевого нейтринного телескопа [Электронный ресурс] / Е.П. Веретенкин [и др.] // БНО ИЯИ РАН - Лаборатория Галлий-германиевого нейтринного телескопа.-Режим доступа: <http://www.inr.ru/rus/bno/best.pdf>, свободный. - С. 3.
- [2]. Janet M. Conrad, William C. Louis, Michael H. Shaevitz, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 63, 45 (2013), arXiv:1306.6494 [hep-ex].
- [3]. Janet M. Conrad, William C. Louis, Michael H. Shaevitz, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 63, 45 (2013), arXiv:1306.6494 [hep-ex].
- [4]. The MiniBooNE Collaboration], Phys.Rev.Lett.98:231801,(2007), arXiv:0704.1500 [hep-ex].
- [5]. J. N. Abdurashitov et all., [SAGE Collaboration], Phys.Rev.C80:015807,2009, arXiv:0901.2200 [nucl-ex].
- [6]. Carlo Giunti, Marco Laveder, Phys.Rev.C83:065504, (2011), arXiv:1006.3244 [hep-ph].
- [7]. Герштейн С. С. // Соросовский образовательный журнал. 1997. С. 82. №8.
- [8]. Герштейн С. С. // Соросовский образовательный журнал. 1997. №8. С. 83.
- [9]. Поиск осцилляционных переходов $\nu_e \longrightarrow \nu_x$ на очень коротких расстояниях с источником нейтрино ^{51}Cr на двойной металлической Ga мишени Баксанского галлий - германиевого нейтринного телескопа [Электронный ресурс] / Е.П. Веретенкин [и др.] // БНО ИЯИ РАН - Лаборатория Галлий-германиевого нейтринного телескопа.-Режим доступа: <http://www.inr.ru/rus/bno/best.pdf>, свободный. - С. 5.
- [10]. БНО ИЯИ РАН - Лаборатория Галлий-германиевого нейтринного телескопа [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.inr.ru/rus/bno/lggnt.html>, свободный. - Загл. с экрана.
- [11]. БНО ИЯИ РАН - Лаборатория Галлий-германиевого нейтринного телескопа [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.inr.ru/rus/bno/lggnt.html>, свободный. - Загл. с экрана.
- [12]. Поиск осцилляционных переходов $\nu_e \longrightarrow \nu_x$ на очень коротких расстояниях с источником нейтрино ^{51}Cr на двойной металлической Ga мишени Баксанского галлий - германиевого нейтринного телескопа [Электронный ресурс] / Е.П. Веретенкин [и др.] // БНО ИЯИ РАН - Лаборатория Галлий-германиевого нейтринного телескопа.-Режим доступа: <http://www.inr.ru/rus/bno/best.pdf>, свободный. - С. 9.
- [13]. Поиск осцилляционных переходов $\nu_e \longrightarrow \nu_x$ на очень коротких расстояниях с источником нейтрино ^{51}Cr на двойной металлической Ga мишени Баксанского галлий - германиевого нейтринного телескопа [Электронный ресурс] / Е.П. Веретенкин [и др.] // БНО ИЯИ РАН - Лаборатория Галлий-германиевого нейтринного телескопа.-Режим доступа: <http://www.inr.ru/rus/bno/best.pdf>, свободный. - С. 9.

- [14]. Поиск осцилляционных переходов $\nu_e \longrightarrow \nu_x$ на очень коротких расстояниях с источником нейтрино ^{51}Cr на двойной металлической Ga мишени Баксанского галлий - германиевого нейтринного телескопа [Электронный ресурс] / Е.П. Веретенкин [и др.] // БНО ИЯИ РАН - Лаборатория Галлий-германиевого нейтринного телескопа.-Режим доступа: <http://www.inr.ru/rus/bno/best.pdf>, свободный. - С. 10.
- [15]. Поиск осцилляционных переходов $\nu_e \longrightarrow \nu_x$ на очень коротких расстояниях с источником нейтрино ^{51}Cr на двойной металлической Ga мишени Баксанского галлий - германиевого нейтринного телескопа [Электронный ресурс] / Е.П. Веретенкин [и др.] // БНО ИЯИ РАН - Лаборатория Галлий-германиевого нейтринного телескопа.-Режим доступа: <http://www.inr.ru/rus/bno/best.pdf>, свободный. - С. 34.
- [16]. Поиск осцилляционных переходов $\nu_e \longrightarrow \nu_x$ на очень коротких расстояниях с источником нейтрино ^{51}Cr на двойной металлической Ga мишени Баксанского галлий - германиевого нейтринного телескопа [Электронный ресурс] / Е.П. Веретенкин [и др.] // БНО ИЯИ РАН - Лаборатория Галлий-германиевого нейтринного телескопа.-Режим доступа: <http://www.inr.ru/rus/bno/best.pdf>, свободный. - С. 11.
- [17]. Поиск осцилляционных переходов $\nu_e \longrightarrow \nu_x$ на очень коротких расстояниях с источником нейтрино ^{51}Cr на двойной металлической Ga мишени Баксанского галлий - германиевого нейтринного телескопа [Электронный ресурс] / Е.П. Веретенкин [и др.] // БНО ИЯИ РАН - Лаборатория Галлий-германиевого нейтринного телескопа.-Режим доступа: <http://www.inr.ru/rus/bno/best.pdf>, свободный. - С. 12.
- [18]. Поиск осцилляционных переходов $\nu_e \longrightarrow \nu_x$ на очень коротких расстояниях с источником нейтрино ^{51}Cr на двойной металлической Ga мишени Баксанского галлий - германиевого нейтринного телескопа [Электронный ресурс] / Е.П. Веретенкин [и др.] // БНО ИЯИ РАН - Лаборатория Галлий-германиевого нейтринного телескопа.-Режим доступа: <http://www.inr.ru/rus/bno/best.pdf>, свободный. - С. 34.
- [19]. Particle Data Group. Reviews / Statistics : <http://pdg.lbl.gov/2014/reviews/rpp2014-rev-statistics.pdf> Revised September 2013 by G. Cowan (RHUL). P. 20.