

Аннотация на проект
“G&M”
Поиск безнейтринного двойного бета распада ^{76}Ge

Участники от ОИЯИ:

*В.Б.Бруданин, К.Н.Гусев, В.Г.Егоров, А.А.Клименко, О.И.Кочетов, И.Б.Немченко,
М.В.Ширченко, В.Г.Сандуковский, А.А.Смольников, Д.Р.Зинатулина.*

Руководитель проекта: А.А.Смольников (smoln@jinr.ru)

1. Физика нейтрино и безнейтринный двойной бета распад

С момента первого экспериментального наблюдения нейтрино эти частицы интенсивно исследуются по нескольким экспериментальным направлениям, и изучение их свойств уже значительно расширило наши знания об электрослабом взаимодействии. Однако, до сих пор остается открытым вопрос является ли нейтрино частицей майорановского типа. Безнейтринный двойной бета распад ($0\nu\beta\beta$) является уникальным процессом, открытие и изучение которого даст сведения о таких пока неизвестных параметрах как тип и массовая шкала нейтрино. Если безнейтринный двойной бета распад будет обнаружен, это однозначно подтвердит, что нейтрино – майорановская частица. Интерес к экспериментам по поиску $0\nu\beta\beta$ -распада особенно возрос после того, как были экспериментально обнаружены нейтринные осцилляции, что однозначно указывает на ненулевую массу нейтрино. Открытие $0\nu\beta\beta$ -распада позволит также определить эффективную массу электронного нейтрино $\langle m_{ee} \rangle$ и выяснить, какая иерархия нейтринных массовых состояний реализуется в природе.

2. Предшествующие и современные эксперименты

О возможном наблюдении двойного бета распада впервые было объявлено по результатам не прямых геохимических экспериментов с ^{130}Te , проведенным Ингххамом и Рейнольдсом в 1950 г. Первое прямое экспериментальное обнаружение незапрещенной двухнейтринной моды двойного бета распада $2\nu\beta\beta$ было сделано Эллиотом, Ханом и Моу лишь в 1987 г. С тех пор измерение разрешенного $2\nu\beta\beta$ -распада было проведено для более 10 различных изотопов с периодами полураспада в области 10^{19} – 10^{21} лет.

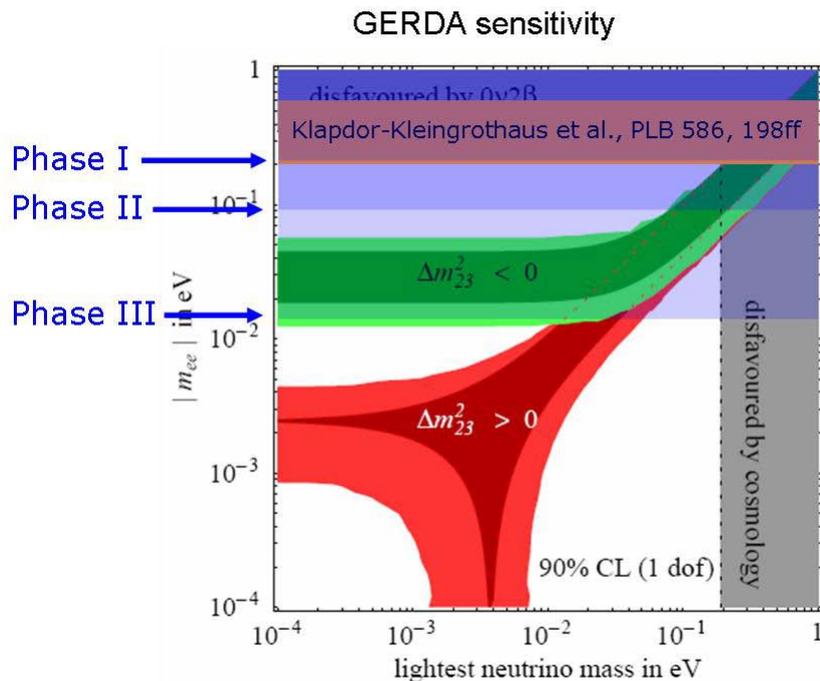
Сегодня основные усилия направлены на поиск безнейтринной моды двойного бета распада $0\nu\beta\beta$, запрещенной законом сохранения лептонного числа. На данный момент наиболее чувствительными экспериментами по поиску $0\nu\beta\beta$ -распада являются эксперименты с использованием полупроводниковых детекторов, изготовленных из германия, обогащенного по изотопу ^{76}Ge . В экспериментах Heidelberg-Moscow Experiment (HdM) и International Germanium Experiment (IGEX) установлены лишь ограничения на период полураспада относительно $0\nu\beta\beta$ -распада ^{76}Ge 1.9×10^{25} у (90% CL) и 1.6×10^{25} у (90% CL), соответственно. Однако, часть коллаборации HdM после дополнительной обработки результатов, объявила о присутствии положительного избытка событий, соответствующего периоду полураспада $T_{1/2} = 1.2 \times 10^{25}$ лет, что в терминах массы электронного нейтрино соответствует $\langle m_{ee} \rangle = 0.44$ eV).

В настоящее время два больших эксперимента работают в режиме набора данных – это NEMO-3 и CUORICINO. Установка NEMO-3 состоит из большой газовой трековой камеры и сцинтилляционного калориметра, внутри которых расположено 10 кг источников в виде тонких фольг, изготовленных из обогащенных по интересующим

изотопам материалов, в основном это 7 кг ^{100}Mo . Эксперимент CUORICINO направлен на поиск безнейтринной моды двойного бета распада с помощью TeO_2 болометров. Установка состоит из помещенных в низкотемпературный рефрижератор 62-х кристаллов TeO_2 с общей массой 40 кг. Целью обоих экспериментов является достижение чувствительности по эффективной массе нейтрино на уровне 0.2-0.5 эВ. Эксперименты начали набор данных с 2003 г., но до сих пор безнейтринный двойной бета распад не обнаружен.

3. Предлагаемые эксперименты нового поколения

Целью экспериментов нового поколения является увеличение чувствительности измерений как минимум на порядок величины. Эта цель обусловлена, в первую очередь, результатами осцилляционных нейтринных экспериментов.



Как показано на приведенном выше рисунке, измеренные значения параметров смешивания для солнечных и атмосферных нейтрино оставляют для соотношения трех массовых состояний нейтрино только две возможные схемы – это так называемые нормальная иерархия ($m_1 < m_2 < m_3$) и обратная иерархия ($m_1 > m_2 > m_3$). В случае нормальной иерархии, эффективная масса электронного нейтрино $\langle m_{ee} \rangle$ может быть порядка 10 meV даже при $m_1 \ll 10$ meV, а в случае обратной иерархии она может быть порядка 45 meV. Таким образом, достижение чувствительности на уровне 45 meV рассматривается как ближайшая цель экспериментов нового поколения. В планируемых экспериментах предлагается использовать различные экспериментальные методы для исследования нескольких различных изотопов (как показано в таблице ниже).

Эксперимент	Источник	Метод	FWHM at $Q_{\beta\beta}$ (keV)	Чувствительность, m_{ee} , (eV)
CUORE	^{130}Te	0.76 t TeO_2 bolom	5	0.03-0.05
EXO	^{136}Xe	1 t $^{\text{enr}}\text{Xe}$	120	0.05-0.14
SUPERNEMO	^{100}Mo	0.1 t $^{\text{enr}}\text{Mo}$ track.	50	0.04-0.07
MAJORANA	^{76}Ge	0.5 t $^{\text{enr}}\text{Ge}$ diodes	4	0.02-0.07
GERDA	^{76}Ge	0.5 t $^{\text{enr}}\text{Ge}$ in LN/LAr	4	0.02-0.07

Очевидно, что для достижения таких целей необходимо значительное увеличение массы исследуемых изотопов. Для увеличения чувствительности также требуется сведение к минимуму радиоактивных примесей и увеличение эффективности защиты от внешнего излучения. Таким образом, существенное снижение фона установок является первым приоритетом при разработке и осуществлении всех новых проектов. В основном по этой причине экспериментальная стратегия предлагаемых проектов основана на проведении нескольких фаз (обычно 2-3), с тем, чтобы с каждой фазой увеличивать массу источника и улучшать параметры установки на основе полученного опыта. Поскольку $2\nu\beta\beta$ -распад сам по себе является неустранимым фоном для $0\nu\beta\beta$ -распада, также крайне важно иметь хорошее энергетическое разрешение.

Как отмечено выше, лучшие пределы на эффективную массу электронных нейтрино были получены в экспериментах с использованием полупроводниковых детекторов, изготовленных из ^{76}Ge . В этом случае германиевый гамма-спектрометр с прекрасным энергетическим разрешением является одновременно источником $\beta\beta$ -распада, что приводит практически к 100% эффективности регистрации. Энергия $0\nu\beta\beta$ -распада для ^{76}Ge равна 2039 keV, что не исключает присутствия фоновых событий от естественной радиоактивности. С начала использования германиевых детекторов для данных целей, последовательно вводились различные улучшения методики проведения таких экспериментов. В основном они состоят в следующем:

- 1) Активная защита от космических лучей;
- 2) Подземное расположение установок;
- 3) Использование отобранных низкорadioактивных материалов для детектора и защиты;
- 4) Использование для криостатов сверхчистой электролитической меди;
- 5) Минимальная экспозиция германия и меди под воздействием космических лучей;
- 6) Использование германия, обогащенного по ^{76}Ge с 7.8% до 86%;
- 7) Детальный анализ формы импульсов.

В настоящее время в стадии создания находятся два эксперимента нового поколения с использованием германия, обогащенного по ^{76}Ge - это GERDA и MAJORANA. На первых стадиях этих экспериментов планируется использовать 15-50 кг ^{76}Ge при различных экспериментальных методиках. В дальнейшем, на основе полученного на первых стадиях опыта, будет разработан совместный эксперимент (с оптимальной конфигурацией и массой порядка 0,5 т ^{76}Ge) в рамках объединенной GERDA-MAJORANA коллаборации с целью достижения чувствительности на уровне 10 meV.

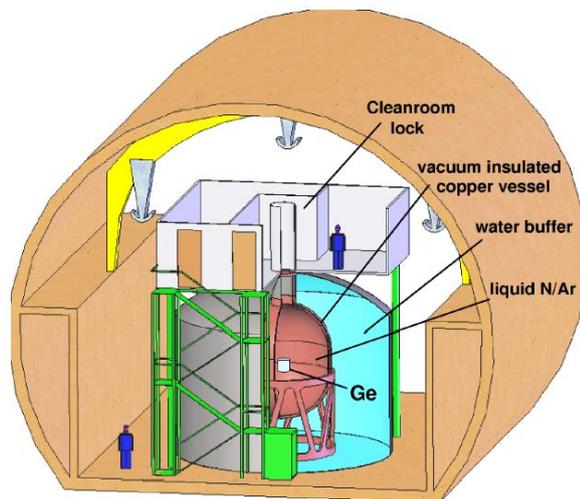
4. Эксперименты GERDA и MAJORANA

Оба проекта направлены на создание экспериментов нового поколения по поиску $0\nu\beta\beta$ -распада с использованием большого количества обогащенного материала ^{76}Ge , накопленного опыта в производстве германиевых детекторов, глубоких подземных лабораторий, новейших методов набора и анализа данных.

GERDA (the GERmanium Detector Array) будет оперировать с открытыми германиевыми детекторами (из обогащенного ^{76}Ge), погруженными непосредственно в жидкий аргон (LAr), как показано на рисунке ниже.

В первой фазе эксперимента будут использоваться существующие детекторы (около 18 кг ^{76}Ge), взятые из предыдущих экспериментов Heidelberg-Moscow (HdM) и IGEX; во второй фазе будут добавлены новые сегментированные детекторы (22 кг ^{76}Ge), изготовленные из недавно обогащенного германия.

Концептуальный дизайн GERDA основан на опыте предыдущих экспериментов, которые показали, что основной фон детектора обусловлен не самим германиевым кристаллом, а окружающими его материалами. Поэтому сведение к минимуму количества окружающих материалов и погружение германиевых кристаллов в сверхчистый жидкий аргон должно дать существенное снижение фона детекторов.



Криостат из нержавеющей стали с внутренней защитой из меди будет заполнен 100 тоннами LAr и размещен внутри танка, заполненного водой. Буферный объем из ультрачистой воды служит с одной стороны в качестве дополнительной защиты от гамма-квантов и нейтронов, а с другой стороны, оснащенный 66-ю фэу, работает как черенковский детектор в качестве эффективной вето системы против мюонов космических лучей. Панели из пластмассовых сцинтилляторов на верхней части установки предназначены для защиты детекторов от мюонов, проходящих через горловину криостата. В настоящее время установка GERDA находится в стадии сборки в подземной лаборатории LNGS (Италия) на глубине 3400 м водного эквивалента.



Для того, чтобы достичь уровня фона, требуемого для проведения 2-ой фазы эксперимента, разрабатываются новые методы подавления внутреннего фона Ge детекторов. Предложена R&D программа по разработке детекторов нового типа – сегментированных и BeGe, которые способны много-точечные фоновые события от одно-точечных полезных событий. Для этих же целей разрабатываются методы отбора событий по форме импульса и отбор по антисовпадениям между соседними детекторами. Кроме того исследуется возможность использования сцинтилляционных

свойств жидкого аргона для его применения в качестве активной защиты. Эти новые методы должны дать возможность достичь на 2-ой фазе индекса фона $< 10^{-3}$ событий/кэВ·кг·год .

На 1-ой фазе эксперимента (2009 – 2011 г.г.), соответствующей экспозиции 30 кг х лет, GERDA будет способна либо подтвердить объявленный ранее положительный результат (H. Klapdor's et al. (KKGH), $T_{1/2} = 1.2 \times 10^{25}$ лет, $\langle m_\nu \rangle = 0.44$ эВ), либо закрыть его с высокой статистической достоверностью вне зависимости от неопределенностей в расчетных матричных элементах. Если не будет зарегистрировано событий, будет достигнут предел на период полураспада $T_{1/2} > 3 \times 10^{25}$, что в терминах эффективной массы нейтрино будет давать ограничение $m_\nu < 0.3$ эВ.

На 2-ой фазе эксперимента (2012 – 2016 г.г.) будет добавлено около 22 кг детекторов нового типа и общая масса детекторов достигнет 40 кг ^{76}Ge . После набора информации, соответствующей экспозиции 150 кг х лет, и при снижении фона до уровня 10^{-3} событий/кэВ·кг·год, предел на период полураспада будет улучшен до значения $T_{1/2} > 1,5 \times 10^{26}$ или в терминах эффективной массы нейтрино $< 0.09 - 0.29$ эВ, в зависимости от значения ЯМЕ. Таким образом, уже на 2-ой фазе эксперимента GERDA будет способна перекрыть область значений эффективной массы нейтрино для модели вырожденной массовой иерархии.

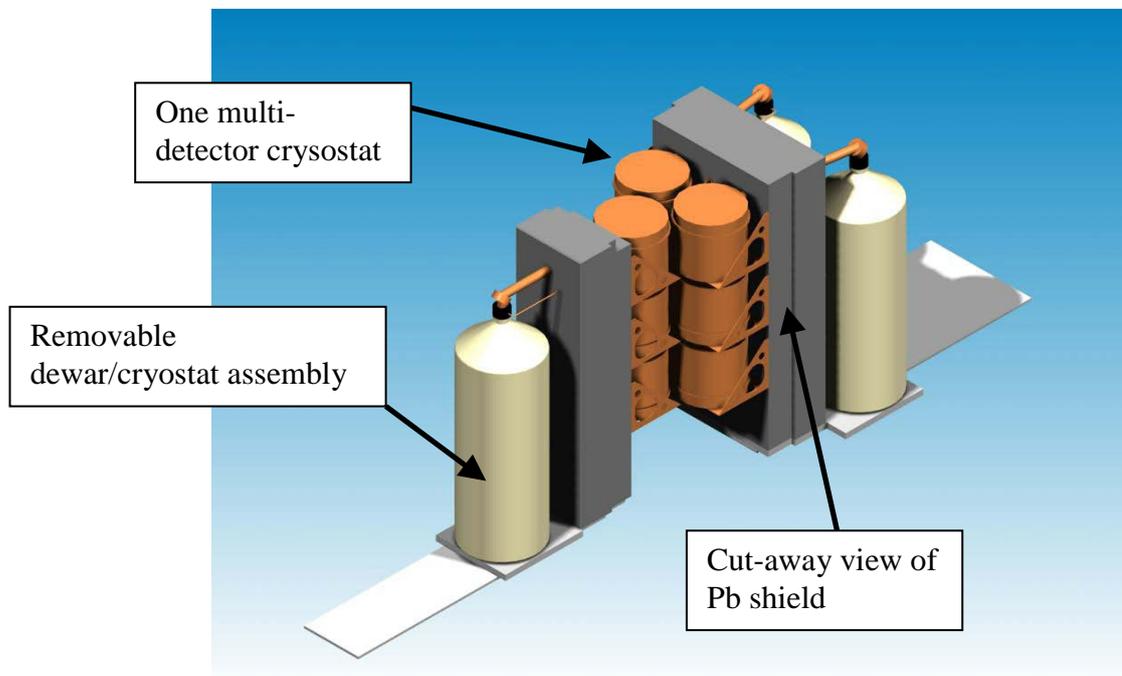
Если и на этой фазе не будет зарегистрировано событий, указывающих на $0\nu\beta\beta$ -распад, в рамках объединенной супер-коллораации GERDA-MAJORANA планируется проведение 3-ей фазы эксперимента (начиная с 2014 г.). Для того, чтобы на этой фазе перекрыть область значений эффективной массы нейтрино для модели обратной массовой иерархии, потребуется около 1 тонны ^{76}Ge при дальнейшем снижении фона до уровня 10^{-4} событий/кэВ·кг·год.

MAJORANA в планируемом полномасштабном эксперименте будет использовать несколько сотен германиевых кристаллов из ^{76}Ge , сгруппированных по 50 детекторов в одном мультidetекторном криостате (традиционного типа) из электролитической меди. Все детекторы будут сегментированными и с возможностью регистрации и анализа формы импульса. На конечном этапе планируется собрать 10 таких модулей в одной защите, т.е. всего будет 500 детекторов с массой каждого 1,05 кг, т.е. общая масса достигнет 500 кг ^{76}Ge .

Несмотря на то, что проект MAJORANA основывается на опробованных и хорошо зарекомендовавших себя в экспериментах HdM и IGEX технологиях, в настоящее время реализуются два R&D проекта с целью отработки и оптимизации инженерного дизайна полномасштабного эксперимента MAJORANA . Эти проекты называются SEGA и MEGA В SEGA эксперименте используется один сегментированный детектор (2 х 6 сегментов) из ^{76}Ge . Основной целью SEGA эксперимента является определение наиболее эффективной комбинации анализа формы импульса и техники сбора и обработки сигналов с различных сегментов. Это необходимо для отбора полезных (single-site) $\beta\beta$ -событий от фоновых (в основном multi-site) событий. Установка MEGA будет состоять из двух сегментированных детекторов (в одном криостате), окруженных тором из 16-и несегментированных детекторов (каждый в своем собственном криостате). Предполагается, что такая тороидальная конструкция будет использоваться и для мульткристалльных модулей в полномасштабном эксперименте MAJORANA.

В настоящее время установлен тесный контакт между GERDA и MAJORANA с целью открытого обмена информацией и координации работ на всех стадиях R&D проектов.

В GERDA коллаборацию входят около 80 ученых из 13 научных центров 6-ти стран (Италия, Германия, Россия, Польша, Бельгия, Швейцария). MAJORANA коллаборация включает около 60 ученых из 16 научных центров 4-х стран (США, Канада, Япония и Россия).



5. Участие группы ОИЯИ в экспериментах GERDA и MAJORANA

Группа ОИЯИ, участвующая в проекте “G&M”, имеет многолетний опыт в постановке и проведении многих низкофоновых экспериментов (таких как NEMO, IGEX, TGV и др.). Члены этой группы являются признанными экспертами в создании и использовании полупроводниковых детекторов, сцинтилляционных пластмассовых детекторов, в работе на подземных установках и в разработке и расчетах сложных экспериментальных установок.

Ученые из ОИЯИ участвуют в большинстве основных работ коллабораций, которые включают, например, разработку конструкции установки и моделирование фоновых составляющих; модификация германиевых детекторов и их долговременное тестирование в жидком аргоне; разработка и создание высокоэффективной мюонной защиты на основе пластмассовых сцинтилляторов; разработку новых методов подавления фона, в том числе активное вето на основе сцинтиллятора LAr; разработка и создание тестовой установки LArGe с объемом жидкого аргона 1 тонна; измерение и отбор по радиационной чистоте конструкционных материалов с помощью низкофоновых Ge гамма-спектрометров; производство специальных альфа-источников для калибровки установок на основе сцинтиллятора LAr; разработку и создания герметичных банипуляторов для перемещения источников в жидком аргоне и т.д.

Группа ОИЯИ имеет уникальный опыт создания и работы с многодетекторными полупроводниковыми установками для проведения низкофоновых экспериментов (TGV-1 и TGV-2). Также накоплен большой опыт по созданию сверхчувствительных радонных детекторов.

Участие группы ОИЯИ в подготовке и проведении экспериментов GERDA и MAJORANA приветствуется этими коллаборациями, наши зарубежные коллаборанты надеются, что ОИЯИ будет играть существенную роль в осуществлении данных проектов, и определенный вклад со стороны ОИЯИ уже сделан:

Первые работы были успешно проведены группой ОИЯИ в рамках R&D программы для создания высокоэффективной мюонной защиты установок GERDA и MAJORANA. Для этого была разработана оригинальная конструкция пластмассовых сцинтилляционных модулей. В этих модулях свет собирается посредством спектросмещающих оптических волокон на ультракомпактные ф.э.у. Такая технология позволила создавать компактные, наборные, относительно простые и удобные при

сборке и работе сцинтилляционные детекторы с высокой временной стабильностью и однородностью светосбора. Такой дизайн сцинтилляционного мюонного вето был одобрен GERDA коллаборацией и первые 20 модулей уже изготовлены и протестированы. Для проведения измерений и отбора по радиационной чистоте конструкционных материалов группа ОИЯИ имеет несколько низкофоновых Ge гамма-спектрометров, расположенных как в ОИЯИ, так и подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории. Группа ОИЯИ имеет хорошо оборудованные лаборатории для производства, сборки и тестирования как пластмассовых сцинтилляторов, так и полупроводниковых детекторов. Только вклад группы ОИЯИ в проект MAJORANA позволил уже сейчас начать работы на этапе SEGA, так как для этого нами было поставлено 4 кг произведенного в России обогащенного ^{76}Ge .

Наконец, необходимо отметить, что для реализации проекта "G&M", будет необходимо непосредственное участие членов группы ОИЯИ на месте сборки установок и во время их запуска, тестовых, калибровочных и основных долговременных измерений, а также для проведения набора и экспресс-анализа получаемой экспериментальной информации.

Ожидаемые при реализации данного проекта результаты должны существенно улучшить имеющиеся знания о природе и свойствах нейтрино, что должно привести к новой физике за рамками стандартной модели. В случае успешной реализации всех запланированных фаз экспериментов, ожидаемая чувствительность GERDA-MAJORANA может достичь значений эффективной массы майорановского электронного нейтрино 10 meV и перекрыть область обратной массовой иерархии, что будет намного превосходить уровень сегодняшних экспериментов.

GERDA коллаборация планирует закончить сооружение комплекса и начать последовательно вводить в строй детектирующую установку в 2009 г. Начало полномасштабного совместного эксперимента GERDA-MAJORANA запланировано на 2014 год.

Более подробную информацию о GERDA и MAJORANA проектах можно найти на сайтах:

MAJORANA: <http://majorana.pnl.gov/>

GERDA: <http://www.gerda.mppmu.mpg.de/>

<http://www.mpi-hd.mpg.de/ge76/home.html>

На последнем сайте также отражена совместная GERDA/ MAJORANA активность.

Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления проекта G&M

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 создания мюонного вето GERDA (детектирующая часть, система света сбора)	10	10			
	2. Электроника для мюонного вето	7	4	3		
	3. Механическая часть мюонного вето	3	3			
	4. Материалы и оборудование для проведения калибровок тестовой установки LArGe (создание имплантированных альфа-источников ¹⁴⁸ Gd, химическое оборудование для проведения работ)	3	3			
	5. Создание системы координатного перемещения альфа-источника для тестовой установки LArGe.	2	3			
	Итого	25	22	3		
Необходимые ресурсы	Нормо-часы	ОП ОИЯИ ООЭП ЛЯП	1000	1000		
Источники финансирования	Бюджет	Затраты из бюджета	25	22	3	
	Внебюджетные средства	Вклады коллаборантов. Средства по грантам. Вклады спонсоров Средства по договорам. Другие источники и т.д.	30	10	10	10

Руководитель проекта