



• Магнитная защита больших
фотоэлектронных умножителей
для установки OSIRIS детектора
JUNO

Смирнов О.Ю.(ЛЯП)

7 декабря 2022 г.

Статья в arXiv сегодня : [arXiv:2212.02562](https://arxiv.org/abs/2212.02562) [physics.ins-det]
направлена в JINST

Установка OSIRIS

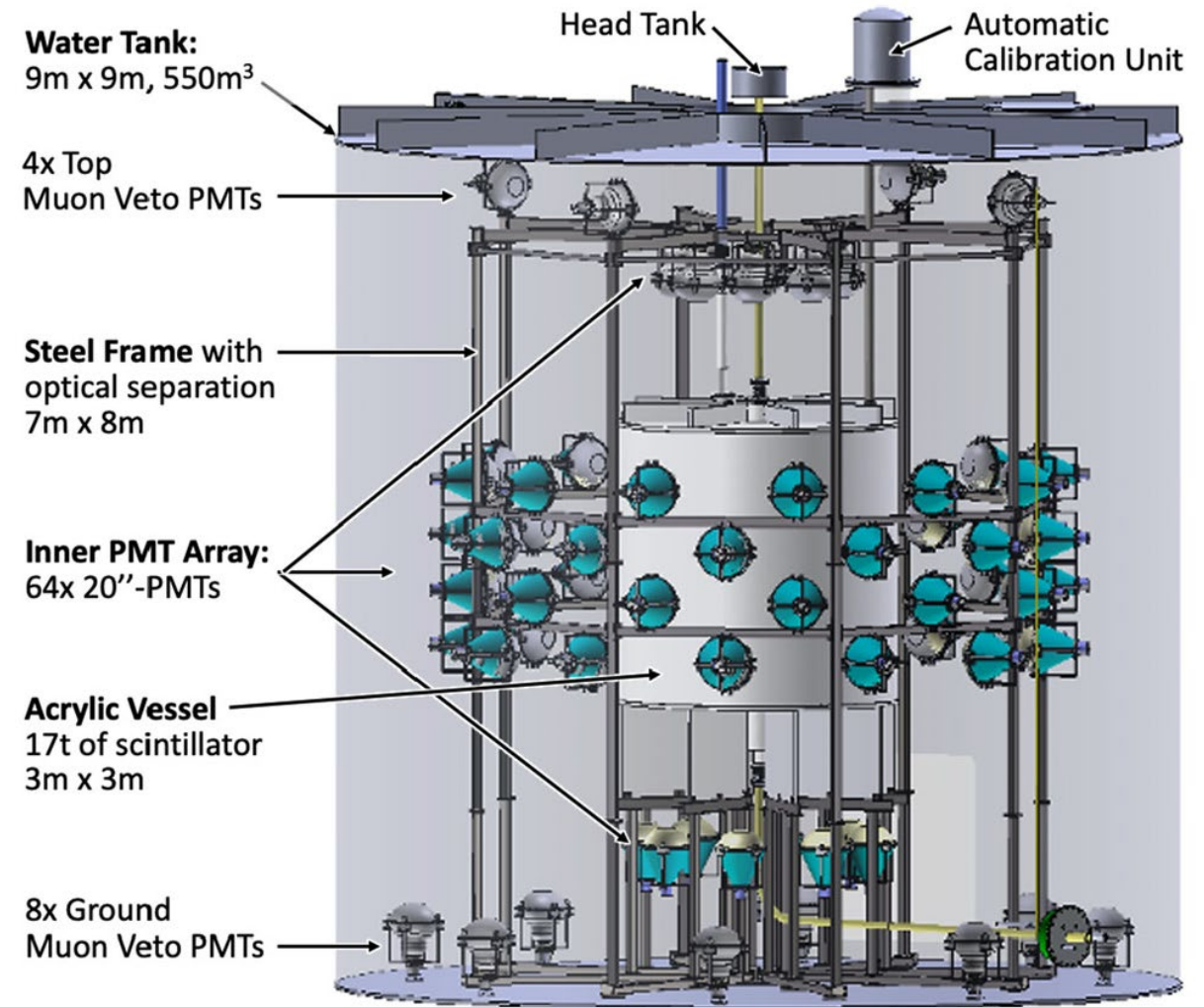
Создается в лаборатории JUNO для предварительного тестирования уровней загрязнения ЖС естественными радиоактивными изотопами (U-238, Th-232, K-40, C-14)

20-тонн ЖС

Оснащен 64 ФЭУ (20" Hamamatsu R15343) для просмотра центрального детектора + 12 ФЭУ мюонного детектора

Этот тип ФЭУ использует электронный умножитель с линейной структурой динодов (box and linear focussed)

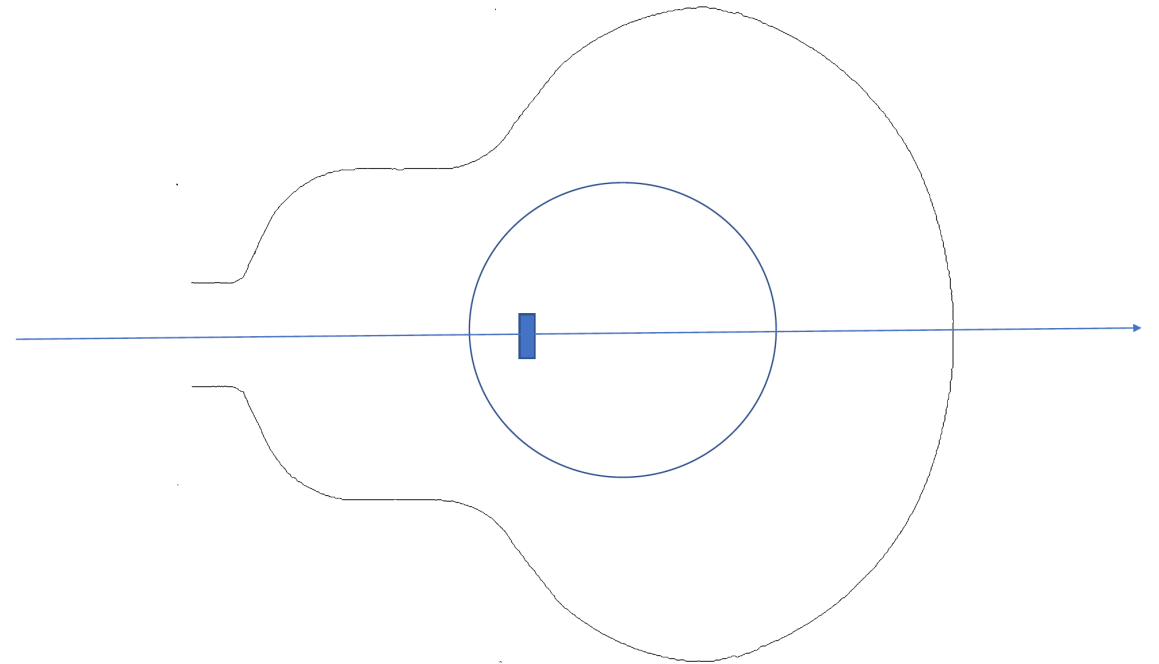
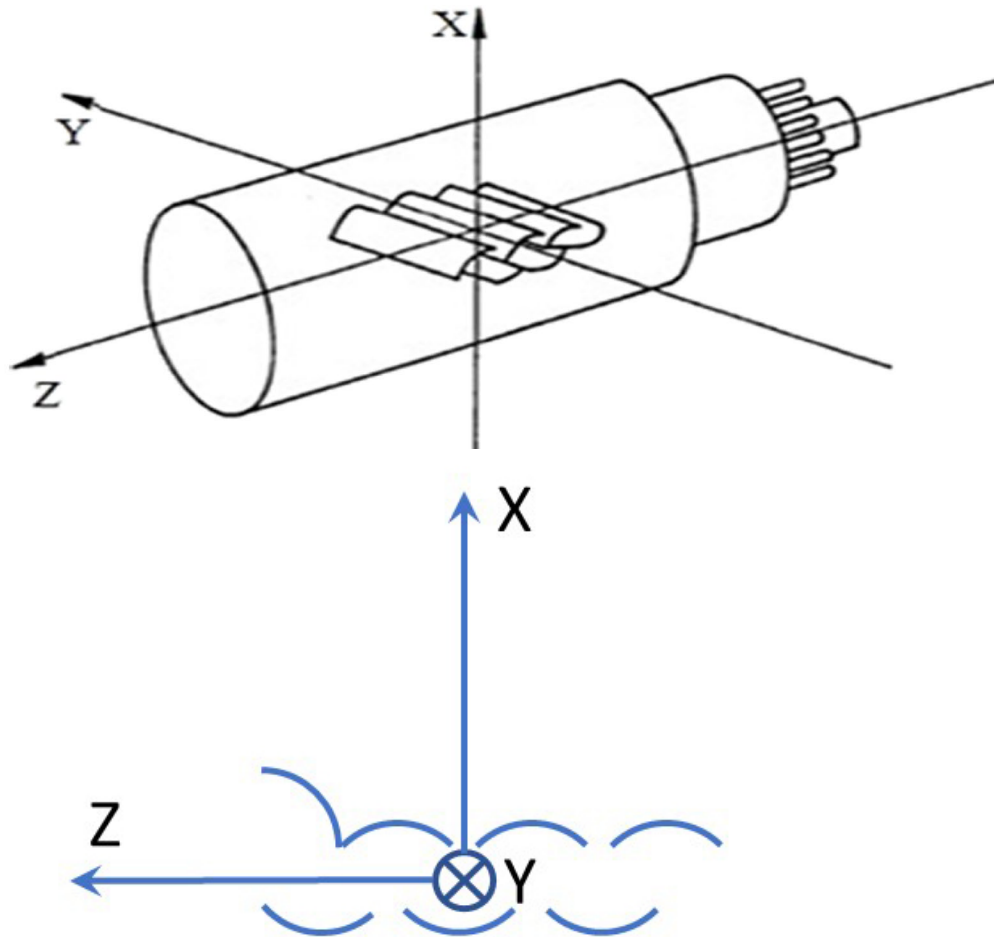
В подземной лаборатории Цзянмэнь (Jiangmen Underground Neutrino Observatory, JUNO)



20" Hamamatsu R15343



Чувствительность к магнитному полю ФЭУ с линейной структурой динодов



Методы защиты (больших) ФЭУ от МПЗ

Пермалловый экран

Пермалловая сетка

Компенсация

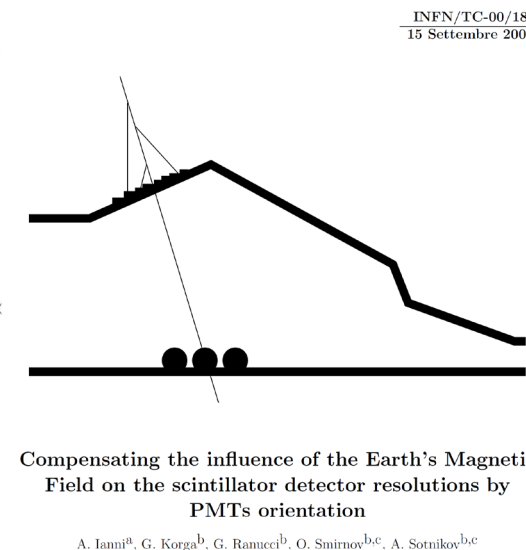
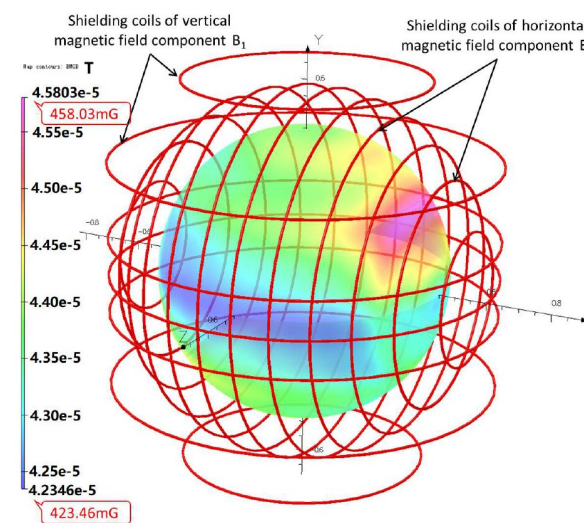
Ориентация

Borexino

Baikal

JUNO

не реализован



минимизация проекции полного поля на ось Y подбором положения ФЭУ относительно оси симметрии.

Выбор защиты для ФЭУ OSIRIS

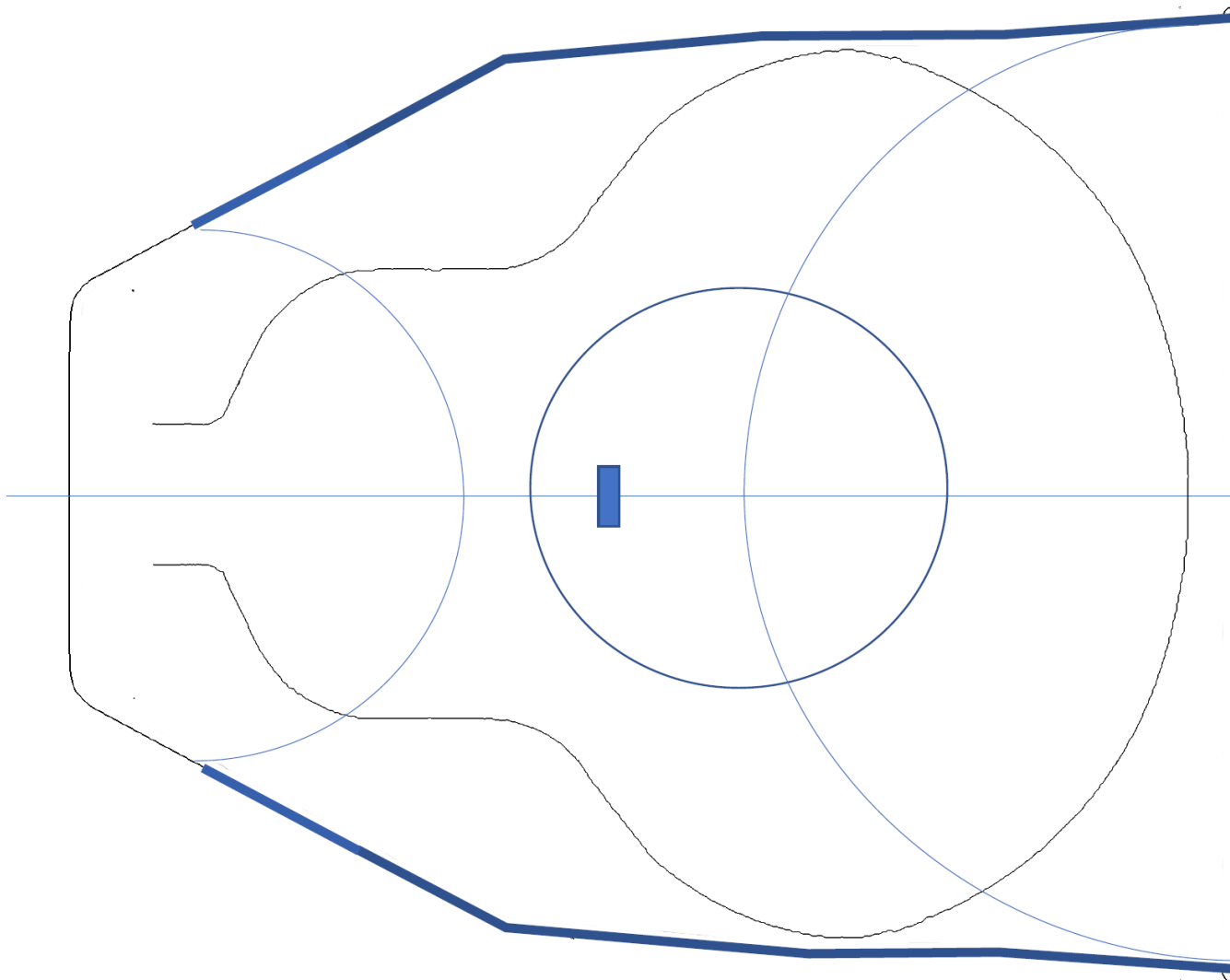
Компенсация поля невозможна из-за ограниченности доступного пространства в подземной лаборатории Цзянмэнь.

Опция сеток: в ЛЯП разрабатывался прототип сетки для ФЭУ детектора JUNO



Проблема с отжигом, затенение фотокатода, нестабильность свойств, требует защитное покрытие, слабая экранировка (фактор ~ 2)

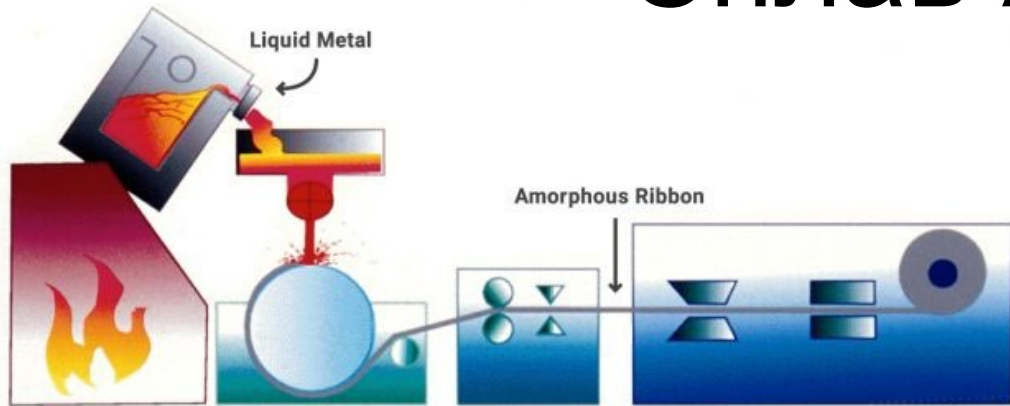
“Открытый” экран



Для формирования магнитного экран использован аморфный магнитомягкий сплав со сверхвысокой магнитной проницаемостью (метглас): лента АМАГ-170 отечественного производства (МСТАТОР, Боровичи)

Магнитная проницаемость $\mu \sim 10^6$ vs $\mu \sim 10^4$ для пермаллоя при стоимости в ~ 10 раз выше

Сплав АМАГ-170



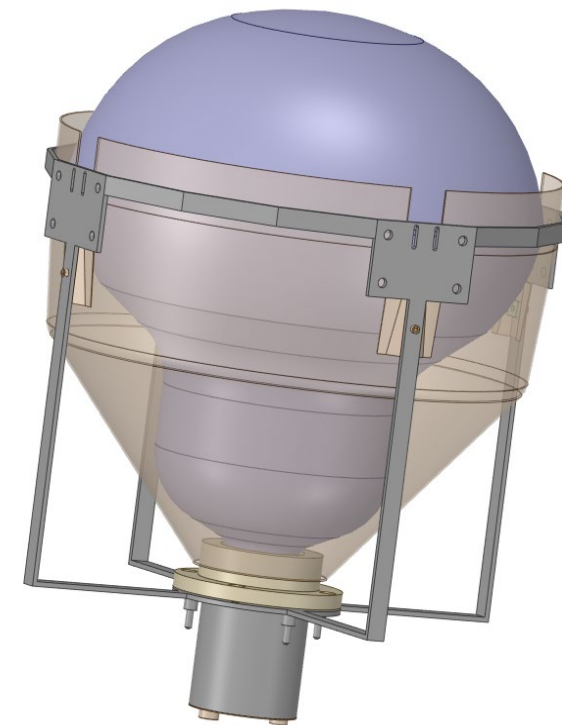
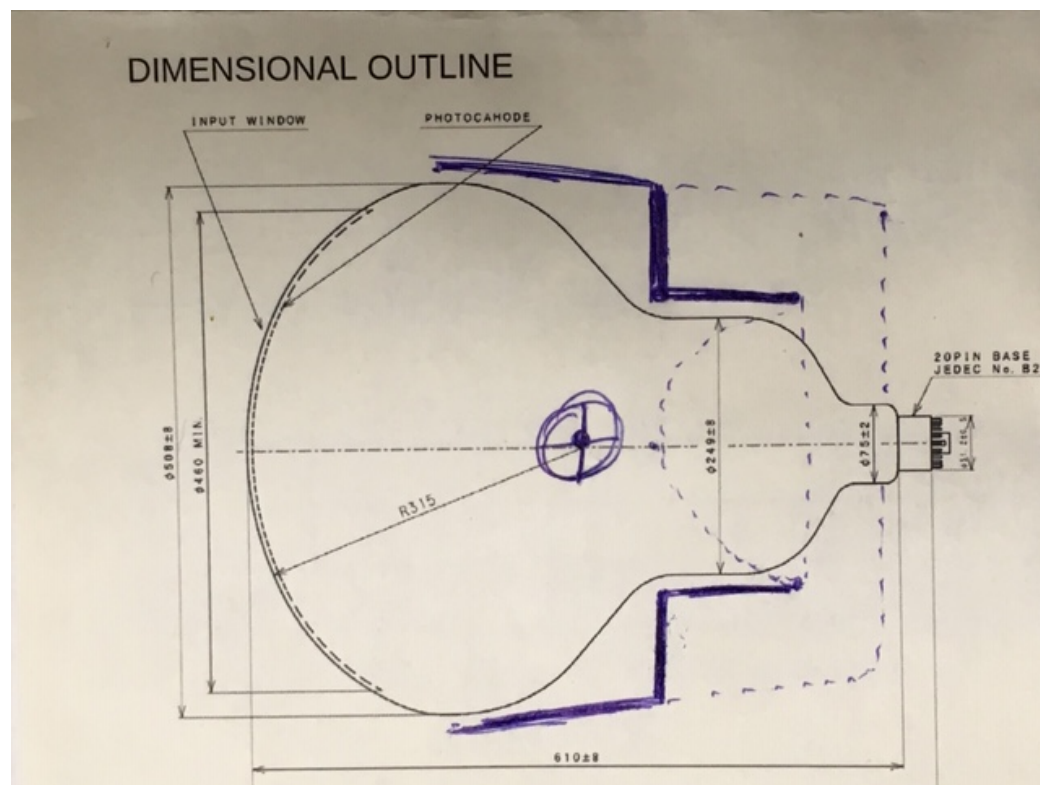
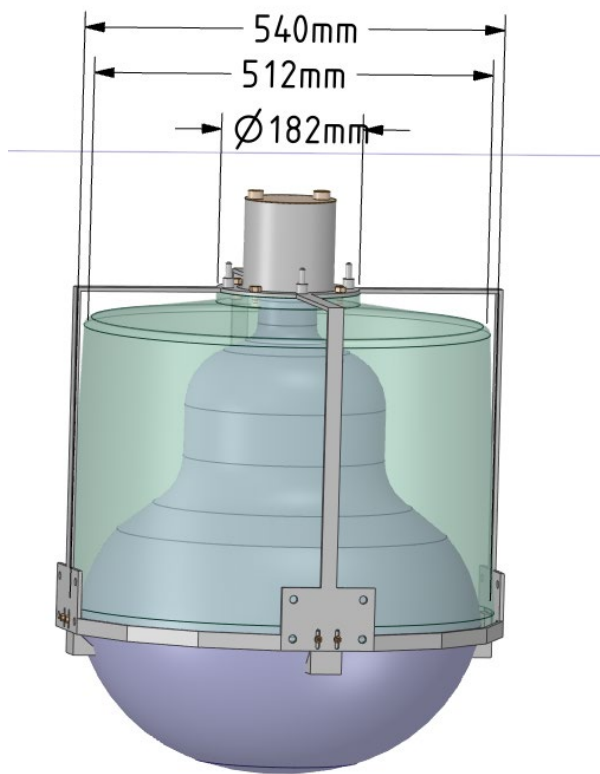
Для нашего изделия использована лента толщиной 25 мкм и шириной 30 (максимальные значения, предлагаемые производителем)

Аморфные материалы имеют высокую магнитную проницаемость. Упорядоченное расположение атомов в этих материалах существует только в ближнем порядке.

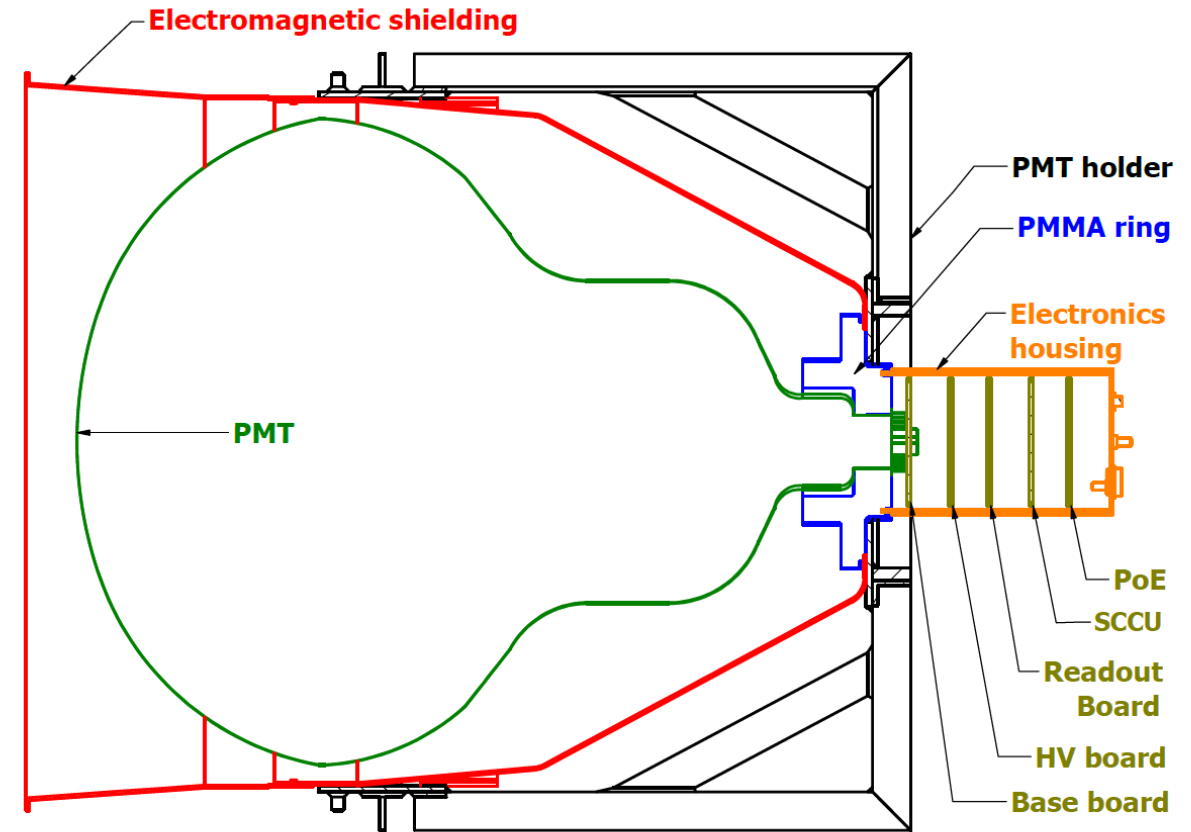
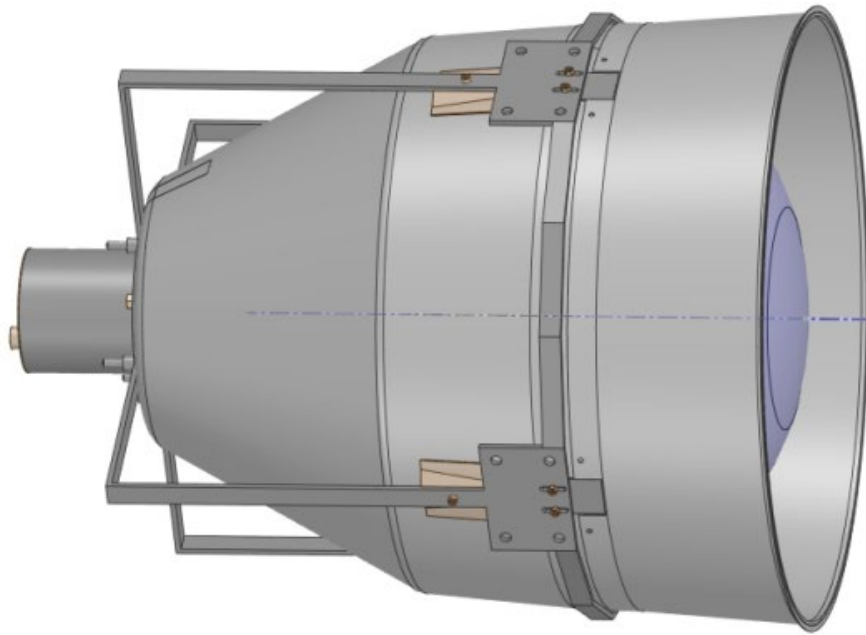
Аморфное состояние формируется при высокой скорости охлаждения (закалке) металлического расплава, атомы при этом не успевают образовать кристаллическую решетку.

Конструкция экрана

Разрабатывалась совместно с конечным изготовителем экранов – ООО “Гидромания” (Минск), они же предложили использовать композитные материалы как основу конструкции.



iPMT OSIRIS в сборе



8 слоев ленты АМАГ-170, между слоями – алюминиевый радиочастотный экран (фольга).
Дополнительный элемент выступает на 5 см от верхушки ФЭУ, окрашен в белый цвет –
работает как концентратор света

Отбор материалов

Требования к жидкому сцинтиллятору JUNO по содержанию долгоживущих радиоактивных изотопов : 10^{-17} - 10^{-16} г/г.

Чувствительность OSIRIS должна соответствовать этим требованиям, при этом измерение должно быть произведено в разумные сроки, иначе в JUNO может попасть “грязный” ЖС. Чувствительность обеспечивается в том числе подбором конструкционных материалов с низким содержанием естественных радиоактивных изотопов.

Мы ориентировались на содержание данных изотопов в стекле ФЭУ.

Анализ химических примесей в материалах производился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС/ICP-МС) в Университете химических технологий им. Д.И. Менделеева (РХТУ) группой под руководством И.Аветисова

Радиоактивность стекла ФЭУ

Материал	U ppb	Th ppb	K ppm	m(U) мкг	m(Th) мкг	m(⁴⁰ K) мкг
Стекло ФЭУ	400	400	60	3600	3600	63

Масса колбы – 9 кг

U <5 Бк/кг (45 Бк)

Th <1.5 Бк/кг (14 Бк)

K <2 Бк/кг (18 Бк)

~80 Бк

Масса используемых материалов, кг (изделие на основе стеклоткани)

Материал	Производитель	Основной элемент	Доп. элемент	Всего
Стеклоткань	ECC Interclas 92140, aero	0.8	0.36	1.16
Винилэфир	Derakane Momentum ^T M 470-300	1.018	0.458	1.476
Черный гелькоут	Maxguard TM GN-NTRL S + сажа	1.4	0.35	1.75
Белый гелькоут	Maxguard TM GN-NTRL S + TiO ₂		0.35	0.35
Аморфная лента	МСТАТОР, АМАГ-170	1.015	0.55	1.565
Алюминиевая фольга		0.06	0.03	0.09
Стальная лента	12x18н10т	0.03	0.02	0.05
Всего		4.343	2.128	6.471

Радиоактивные примеси в используемых материалах (изделие на основе стеклоткани: ~150 Бк)

Материал	U ppb	Th ppb	K ppm	m(U) мкг	m(Th) мкг	m(⁴⁰ K) мкг
Стекловолокно	5833	<3	1460	6770	<4	198
Винил эфир	<0.1	0.9	0.78	0.15	1.3	0.13
Гелькоут черный	<3	<0.3	177	<5.3	<0.5	36
Гелькоут белый	7	7	4.33	2.5	2.5	0.2
АМАГ-170 (0,2 мм)	3	<5	0.84	4.7	<7.8	0.154
Фольга (Al)	170	26	0.96	15.3	2.4	<0.01
Всего (0,2 мм)				6800	<18	234
Стекло ФЭУ	400	400	3600	3600	3600	63

~150 Бк

Масса используемых материалов, кг (изделие на основе углеволокна)

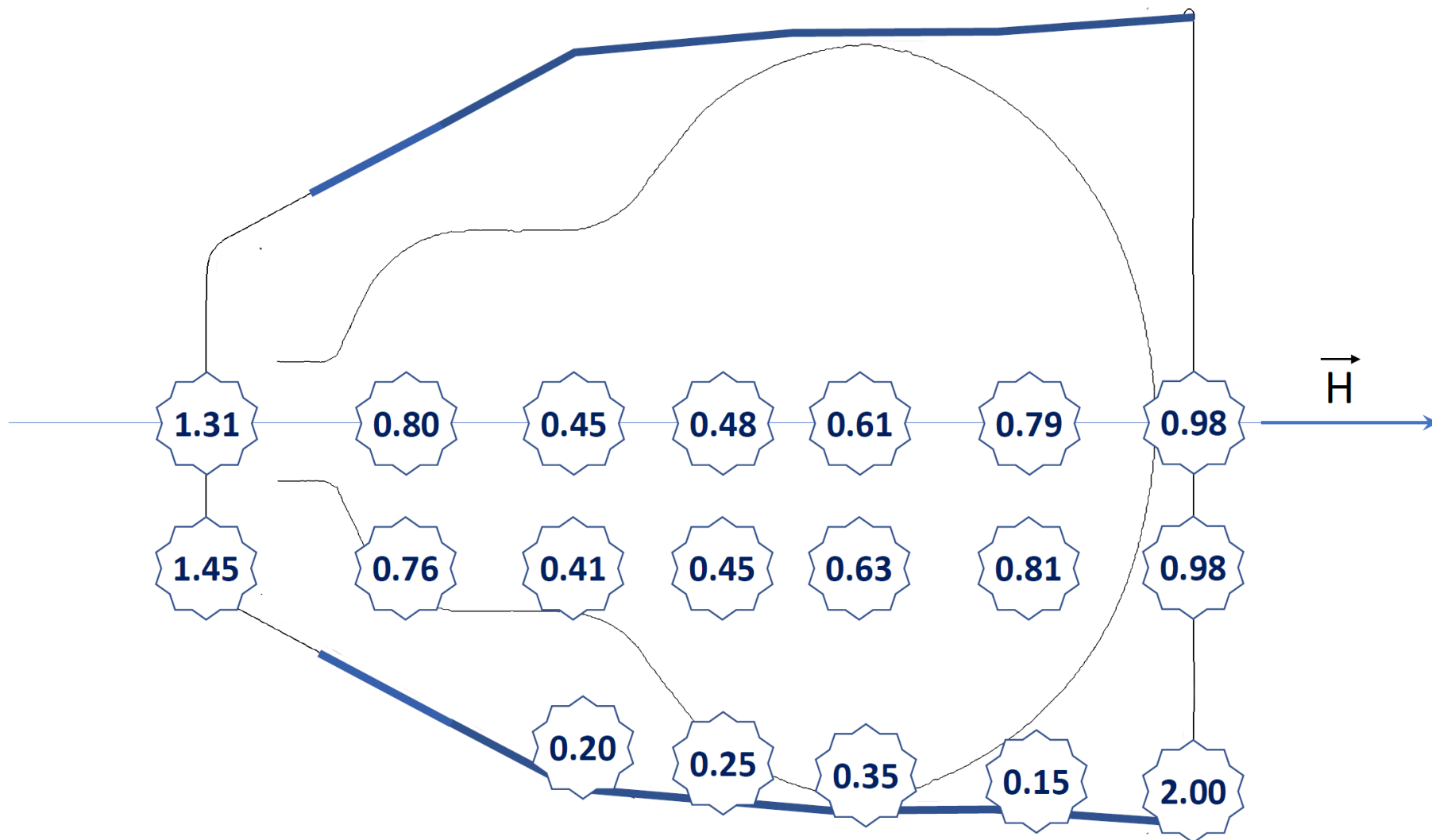
Материал	Производитель	Основной элемент	Доп. элемент	Всего
Carbon fibre	G. Angeloni GG245T	0.57	0.25	0.82
Винилэфир	Derakane Momentum ^T M 470-300	0.82	0.37	1.19
Прозрачный топкоут	Maxguard™ GN-NTRL S	1.26	0.32	1.58
Белый гелькоут	Maxguard™ GN-NTRL S + TiO ₂		0.35	0.35
Аморфная лента	МСТАТОР, АМАГ-170	1.015	0.55	1.565
Алюминиевая фольга		0.06	0.03	0.09
Стальная лента	12x18н10т	0.03	0.02	0.05
Всего		3.755	1.890	5.645

Радиоактивные примеси в используемых материалах (изделие на основе углеволокна: <3 Бк)

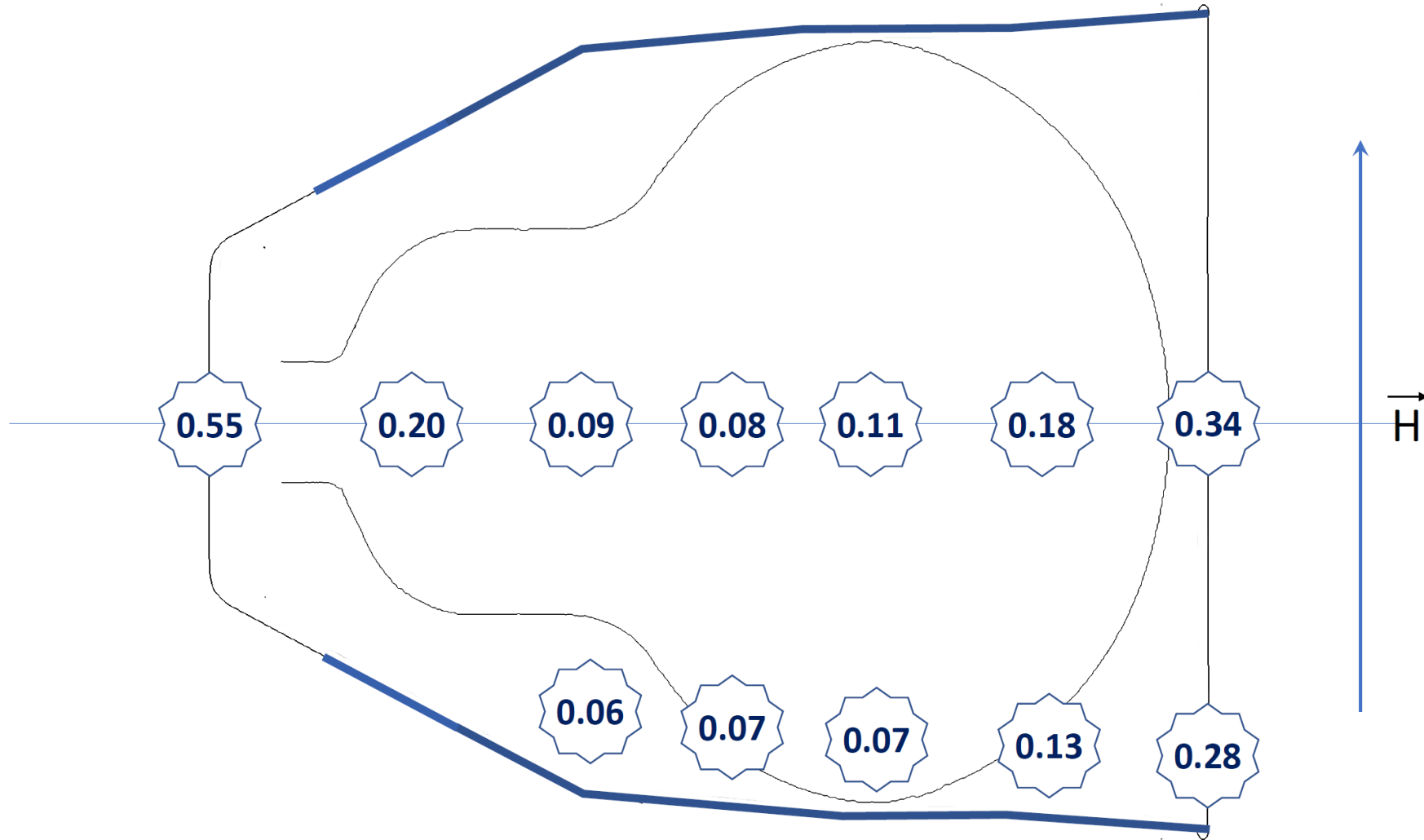
Материал	U ppb	Th ppb	K ppm	m(U) мкг	m(Th) мкг	m(⁴⁰ K) мкг
Углеволокно	3	<5	0.84	0.25	<4.9	1.4
Винил эфир	<0.1	0.9	0.78	<0.12	0.11	0.1
Прозрачный топкоут	<3	<0.3	4.33	<4.8	<0.5	<6.8
Гелькоут белый	7	7	4.33	2.5	2.5	0.2
АМАГ-170 (0,2 мм)	3	<5	0.84	4.7	<7.8	0.154
Фольга (Al)	170	26	0.96	15.3	2.4	<0.01
Всего (0,2 мм)				<27.7	<18	<8.7
Стекло ФЭУ	400	400	3600	3600	3600	63

*содержание примесей в топкоуте не производилось – использованы минимальные из измерений для черного/белого гелькоутов

Экранировка поля по оси Z



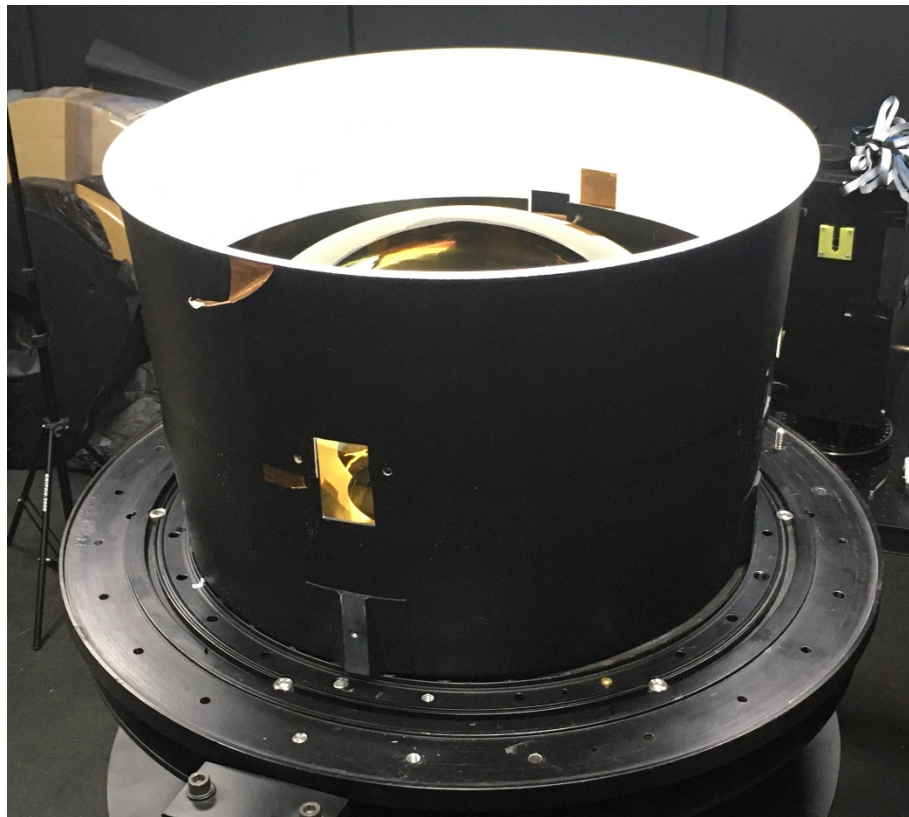
Экранировка поля по оси, перпендикулярной Z



Измерения в “зеленой” лаборатории

Темная комната оснащена набором катушек Гельмгольца, позволяющим компенсировать 2 компоненты поля.

Изменяя ориентацию ФЭУ в пространстве и регулируя токи в компенсационных катушках, можно имитировать работу ФЭУ в полях от 0 до 50 мкТ с ориентацией вдоль оси ФЭУ или перпендикулярно ей.



Интенсивность геомагнитного поля в лаборатории Цзянмэнь составляет 45 $\mu\text{Тл}$, 32.0 градуса к горизонту:

38 $\mu\text{Тл}$ в горизонтальном направлении (на географический север)

24 $\mu\text{Тл}$ в вертикальном направлении.

Измерения

Оценка эффективности магнитной защиты получена из сравнения эффективности регистрации световых импульсов в отсутствие магнитного поля и при приложении магнитного поля.

В качестве референсного значения использовались измерения в компенсированном магнитном поле для ФЭУ с установленным экраном.

Измерения в компенсированном поле с экраном и без него позволили оценить увеличение эффективности регистрации света за счет концентратора света, оно составило $(19.0 \pm 0.7)\%$

При приложении максимального поля (40 мкТл) вдоль наиболее чувствительной оси Y среднее число регистрируемых фотоэлектронов упало фактически в два раза ($\mu = 0.88$ при референсном значении $\mu = 1.85$).

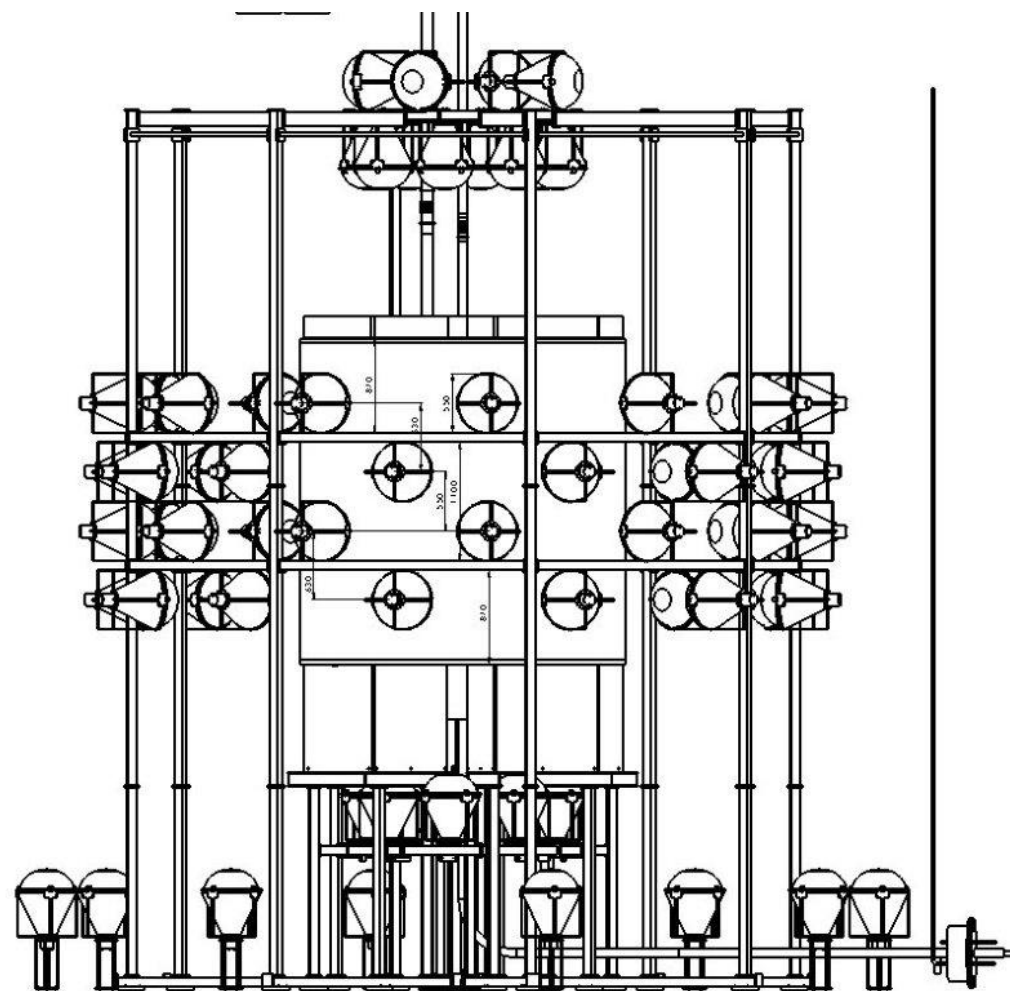
Падение коэффициента электронного усиления, оцениваемое по зарядовым гистограммам, составило 1.4 (среднее значение в зарядовой гистограмме упало до $(7.75 - 4.61) = 3.14$ от референсного значения $(12.31 - 4.49) = 7.82$).

При приложении того же поля вдоль оси X падение эффективности регистрации света и электронного усиления было менее выраженным: фактор 1.09 и 1.14 соответственно.

Изучение эффективности защиты

При помещении ФЭУ в магнитную защиту, характеристики ФЭУ в поле 40 мкТл в пределах ошибки совпали с референсными значениями. Таким образом, разработанный магнитный экран обеспечивает хорошую защиту ФЭУ во внешних магнитных полях до 40 мкТл.

Учитывая, что ФЭУ тестировались при приложении максимальных полей в наиболее неблагоприятном направлении, при установке в детекторе (в горизонтальном или вертикальном направлении) экранировка поля будет более сильной.



Производство

Изготовление элементов магнитной защиты осуществлялось минским ООО "Гидромания" в изолированном помещении с контролем запыленности и с соблюдением мер предосторожности для недопущения попадания загрязнений на поверхности.

Готовое изделие сразу упаковывалось в полиэтилен, чтобы исключить контакт с воздухом, и, соответственно, накопление продуктов распада радона на поверхностях.

Так как около 0.1% стирола, входящего в состав отвердителя (20% раствор стирола в парафине), не связывается в изделии, то данная процедура привела к накоплению газообразного стирола в герметично запаянных полиэтиленовых мешках.

Экраны изготавливались по технологии ручного (контактного) формования на оправках из влагостойкой фанеры.

На оправку наносится защитный слой из стекловолокна и инструментального (матричного) гелькоута.

После отверждения поверхность гелькоута полируется до необходимой чистоты (шероховатости) поверхности.

Технологическая последовательность операций (экран из углеткани)

- нанесение гелькоута: прозрачного для основного элемента или белого для внутренней части дополнительного
- после частичной полимеризации гелькоута (состояние "на отлип") - выкладка внутренних слоёв углеткани с полиэфирным связующим
- далее на поверхность углепластика выкладывался экран магнитной защиты из полос аморфного железа в четыре слоя. Ориентация и угол выкладки лент в слоях выбрана таким образом, чтобы исключить возможность появления "окон" в защите.
- На магнитную защиту выкладывалась алюминиевая фольга, выполняющая роль защиты от радиочастотного излучения. Между слоями аморфного железа и алюминиевой фольги располагались контактные ламели из стальной полосы. Вывод контакта из корпуса наружу осуществляется полоской из пищевой стали
- после установки магнитной и электромагнитной защиты на поверхность конуса выкладывались внешние слои углеткани
- финальная операция - покрытие наружной поверхности изделия защитным слоем декоративного гелькоута (топкоута).



Заключение

Тестирование в лаборатории показало, что разработанный магнитный экран обеспечивает практически идеальную защиту ФЭУ во внешних магнитных полях до 40 мкТл.

Изготовлены 64 экрана магнитной защиты на основе углеволокна для работы в составе основного детектора установки OSIRIS с повышенными требованиями к радиоактивности и 16 экранов на основе стеклоткани для мюонного вето установки OSIRIS с менее жесткими требованиями по радиоактивности.

Экраны отправлены в Германию.

