

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Физический факультет

Кафедра Общей Ядерной Физики

**Курсовая работа**

**«НЕЙТРИННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ JUNO»**

Выполнил студент

203 группы

Бердышев Роман Владимирович

Научный руководитель

к.ф. - м.н., доцент

Широков Евгений Вадимович

Москва, 2020 г.

# Содержание

<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Нейтринные осцилляции.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Нейтринный эксперимент JUNO.....</b>	<b>10</b>
2.1. История создания .....	10
2.2. Научные цели.....	10
2.3. Экспериментальная площадка .....	12
2.4. Детекторы.....	13
2.5. Регистрация сигналов и фоновое излучение.....	15
2.6. Организация проекта .....	15
<b>Список литературы.....</b>	<b>17</b>

## Введение

*"...В микромире должно быть много неожиданностей. Но, без сомнения, удивительнейшая из всех элементарных частиц - это нейтрино. Самое характерное свойство нейтрино - его потрясающая проникающая способность".*

*Бруно Понтекорво. "Загадочные нейтрино"*

Нейтрино – фундаментальная частица, лептон, является электрически нейтральной частицей и обладает очень малой массой и малой величиной сечения взаимодействия с веществом. Изучение этих частиц – одно из важнейших направлений в физике, поскольку оно делает возможным обнаружение эффектов, находящихся за рамками привычной Стандартной модели.

Чтобы спасти законы сохранения энергии, импульса и момента количества движения в бета-распаде, В. Паули в 1931 г. выдвинул гипотезу нейтрино. Основная проблема состояла в том, что, несмотря на вполне определенные энергии начального и конечного состояния ядер, электроны бета-распада имели непрерывный спектр. Для обоснования такого эффекта Паули предположил, что вместе с электроном образуется еще одна частица – нейтрино, которая уносит часть энергии бета-распада. Паули предсказал свойства нейтрино, а также указал, что регистрация подобной частицы окажется весьма трудной задачей.

Он оказался прав – изучение свойств нейтрино потребовало специфических технических решений. Однако в итоге оно было изучено достаточно подробно. В частности, стало ясно, что нейтрино не является истинно нейтральной частицей, следовательно существует явная разница между нейтрино и антинейтрино. Так же не менее важной чертой является существование трех типов нейтрино – электронное, мюонное и таонное соответствующих трем заряженным лептонам. Закон сохранения лептонного заряда считается достаточно важным законом сохранения, а его нарушение

приведет к выходу за пределы Стандартной модели. Именно поэтому и проводятся многочисленные исследования в этой области.

Если задаться вопросом, какая научная задача на данный момент наиболее важна и фундаментальна, то ответ прост – та, решение которой сможет дать ответы на наибольшее количество самых актуальных вопросов современной науки.

В физике элементарных частиц такой центральной задачей является природа нейтрино. Иначе говоря, свойства нейтрино, которые определяют специфику их взаимодействия с внешним миром, то есть их массы, характер их превращения друг в друга, количество типов различных нейтрино, имеют ли они электромагнитные свойства и т.д.

Это действительно важнейшая задача, охватывающая всю физику элементарных частиц, космологию и астрофизику. Наличие ненулевых масс у нейтрино важно для построения современных теорий элементарных частиц, понимания строения Вселенной и образования в ней крупномасштабных структур типа скоплений галактик. Изучение свойств нейтрино, в том числе и электромагнитных, необходимо для решения проблемы дефицита солнечных нейтрино, выяснения механизмов взрыва сверхновых и образования энергии в звездах и в недрах Земли, для понимания причин возникновения космических лучей сверхвысоких энергий. По-видимому, только благодаря исследованию потоков космических нейтрино можно будет получить информацию о самых отдаленных уголках Космоса. До сих пор не решена проблема реликтовых нейтрино, существование которых следует из современной концепции ранней Вселенной.

С другой стороны, физика нейтрино и слабых взаимодействий теснейшим образом граничит с областью физики за рамками Стандартной модели элементарных частиц. Основной интерес здесь лежит в поиске таких процессов, частиц и закономерностей, которые противоречат теоретическим представлениям Стандартной модели.

Исследования по физике нейтрино приобретают особую актуальность после измеренных в 2011 году значений угла смешивания  $\Theta_{13}$  матрицы Понтекорво-Маки-Накагава-Саката. Этот угол оказался достаточно велик, порядка 0,15 рад, что позволяет рассчитывать на перспективное продолжение реакторных и ускорительных экспериментов по изучению иерархии масс нейтрино. Этот вопрос имеет первостепенное значение для понимания роли нейтрино в эволюции Вселенной.

Таким образом, без понимания свойств нейтрино невозможно даже приблизиться к ответу на вопрос о том, почему окружающий нас мир устроен именно так.

# 1. Нейтринные осцилляции

В Стандартной Модели предполагается, что масса нейтрино равна нулю. Прямые измерения массы нейтрино из слабых распадов дают только верхний предел этой массы. В 1957 г. Бруно Понтекорво показал, что доказательство ненулевой массы нейтрино можно получить, наблюдая осцилляции между различными типами нейтрино.

Идея нейтринных осцилляций очень проста. Представим себе, что какой-либо тип нейтрино, например, электронное  $\nu_e$  является смесью двух видов нейтрино  $\nu_1$  и  $\nu_2$  с очень малыми, но различимыми массами  $m_1$  и  $m_2$  (для определенности будем считать  $m_1 < m_2$ ). В этом случае пучок нейтрино  $\nu_e$  (считаем, что все они имеют одинаковые импульсы) в момент образования возникает как совокупность пучков  $\nu_1$  и  $\nu_2$ , смешанных в определенной пропорции, отвечающей  $\nu_e$ . Тогда нейтрино  $\nu_1$ , имеющие меньшую массу, будут удаляться от точки образования с несколько большей скоростью, чем  $\nu_2$ , и поэтому будут постепенно все более опережать последние. Это приведет к изменению относительных долей  $\nu_1$  и  $\nu_2$  в пучке. Уже лишь из части  $\nu_1$  и  $\nu_2$  будет формироваться смесь, отвечающая  $\nu_e$ . Если на пути этого измененного пучка поставить детектор, регистрирующий  $\nu_e$ , то он зафиксирует исчезновение части электронных нейтрино. На каком-то расстоянии от источника их число станет минимальным, а затем начнет вновь увеличиваться и, наконец, достигнет исходного значения. При дальнейшем увеличении расстояния процесс будет периодически повторяться. Это и есть осцилляции нейтрино. Очевидно, что осцилляции невозможны, если все нейтрино имеют нулевые массы. Для их возникновения необходимо, чтобы хотя бы масса одного вида нейтрино была отлична от нуля. Таким образом, нейтринные осцилляции представляют собой периодический процесс изменения типа (аромата) нейтринного пучка.

Рассмотрим ситуацию в случае двух ароматов нейтрино  $\nu_e$  и  $\nu_\mu$ . В этом случае нейтринные состояния  $\nu_e$  и  $\nu_\mu$  являются суперпозицией двух других нейтринных состояний  $\nu_1$  и  $\nu_2$ , характеризующихся определенными массами  $m_1$  и  $m_2$ :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix},$$

где  $\theta$  – угол смешивания.

Исследование нейтринных осцилляций основано на использовании нейтринных пучков, образующихся в различных слабых распадах и имеющих в начальный момент времени  $t = 0$  определенный аромат. Предположим, что создан моноэнергетический пучок нейтрино  $\nu_e$  с энергией  $E$ . Как уже упоминалось выше в этом случае каждое из двух собственных массовых состояний  $\nu_1$  и  $\nu_2$  будет распространяться со своей скоростью, и соотношение между нейтринными компонентами  $\nu_e$  и  $\nu_\mu$  в пучке будет периодически изменяться. Расчеты показывают, что вероятность регистрации  $\nu_\mu$  в пучке, первоначально состоящем только из  $\nu_e$ , на расстоянии  $x$  определяется соотношением

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(x) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left( 1,27 (\Delta m c^2)^2 \frac{x}{E} \right),$$

где  $(\Delta m c^2)^2 = (m_2^2 - m_1^2)c^4$  – разность квадратов масс нейтрино  $\nu_2$  и  $\nu_1$ , измеряемая в эВ<sup>2</sup>,  $x$  – расстояние, пройденное пучком нейтрино, измеряемое в км,  $E$  – энергия нейтрино, измеряемая в ГэВ.

Итак, в процессе своего полета все большее число нейтрино, первоначально возникших как  $\nu_e$ , превращается в  $\nu_\mu$ . После того как доля  $\nu_\mu$  в нейтринном пучке достигнет максимума (а доля  $\nu_e$  минимума), вес значения  $\nu_e$  в пучке начнет возрастать и достигнет первоначального 100%-го значения. Соответственно до нулевого вклада будет падать вес  $\nu_\mu$  в пучке. И так далее. Таким образом, нейтринные осцилляции характеризуются волнообразной

сменой нейтринных ароматов. При этом уже не сохраняются по отдельности  $L_e$  и  $L_\mu$ , а лишь их сумма  $L_e + L_\mu$ .

Вероятности  $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}$  и  $P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e}$  осциллируют на характерной длине  $L$ , называемой длиной осцилляции. Для нее легко получить выражение

$$L[\text{км}] = \frac{\pi E[\text{ГэВ}]}{2 \cdot 1,27[\Delta m c^2(\text{эВ})]^2}$$

Амплитуда осцилляций зависит от  $\sin^2 2\theta$ , т.е. от угла смешивания  $\theta$ , и становится наибольшей при  $\theta = 45^\circ$  (максимум смешивания). В этом случае электронное нейтрино в точках  $x = L(n + 1/2)$ , где  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ , полностью переходит в мюонное.

Если расстояние  $x$  между источником нейтрино и детектором значительно меньше длины осцилляции ( $x \ll L$ ), то нейтрино будут в основном сохранять свой первоначальный аромат:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(x) \approx 0.$$

Для очень больших расстояний ( $x \gg L$ ) из-за начального разброса в импульсе нейтрино осцилляции будут сглажены, и  $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(x)$  будет стремиться к значению  $\frac{1}{2} \sin^2 2\theta$ . Поэтому наилучшие условия для наблюдения осцилляций возникают тогда, когда расстояние  $x$  между источником нейтрино и детектором по порядку величины совпадает с длиной осцилляции  $L$ .

Подведем итоги:

1. В экспериментах по наблюдению осцилляций нейтрино определяется не масса нейтрино, а разность квадратов масс нейтрино.
2. Амплитуда осцилляций определяется параметром  $\sin^2 2\theta$ , а осциллирующая часть вероятности – величиной  $(\Delta m c^2)^2 L/E$ .
3. Первый минимум осцилляций должен наблюдаться при



$$\frac{L[\text{км}]}{E[\text{ГэВ}]} = \frac{\pi}{2 \cdot 1,27[\Delta mc^2(\text{эВ})]^2} \approx \frac{1}{[\Delta mc^2(\text{эВ})]^2}$$

4. Результаты наблюдений осцилляций удобно представлять в координатах параметров  $(\Delta mc^2)^2$  и  $\sin^2 2\theta$ .

Поиски осцилляций нейтрино осуществляются в экспериментах двух типов – по «исчезновению» исходного аромата нейтрино, образующегося в источнике, и по «появлению» других ароматов нейтрино. В первом случае это наблюдение лептонов того же типа, что и исходное нейтрино, во втором – это регистрация лептонов, не соответствующих аромату исходного нейтрино.

Обнаружение нейтринных осцилляций показывает, что нейтрино имеют ненулевую массу и что лептонные квантовые числа не сохраняются. Все это указывает на существование явлений, не укладывающихся в рамки Стандартной Модели, и открывает новые направления исследований.

## **2. Нейтринный эксперимент JUNO**

Подземная нейтринная обсерватория Цзянмэнь (JUNO) – это многоцелевой нейтринный эксперимент, разработанный для определения иерархии масс нейтрино и точного измерения осцилляционных параметров путем обнаружения реакторных нейтрино на атомных электростанциях Янцзян и Тайшань, а также для наблюдения и изучения сверхновых, солнечных, атмосферных и гео- нейтрино. Данный эксперимент будет осуществлен с помощью жидкостного сцинтилляционного детектора на 20 тысяч тонн с беспрецедентным разрешением 3% (при 1 МэВ) на глубине 700 метров под землей.

### **2.1. История создания**

Институт физики высоких энергий (ИВФЭ) предложил вторую фазу эксперимента с реакторными нейтрино в 2008 году, впоследствии названного JUNO. В феврале 2013 года JUNO был одобрен Академией наук Китая и получил поддержку в рамках Программы Стратегических Приоритетных Исследований. Схема эксперимента и бюджет были рассмотрены в марте того же года. Бюджет на 2013 и 2014 годы был утвержден, а 5-летний и весь 8-летний бюджет (~ 330 млн. долларов США) были рассмотрены. Комитет по управлению проектом был сформирован. Структура разбивки работ включает 10 подсистем. ИВФЭ основала местную корпорацию в Кайпине и Центр Нейтринных Исследований в Кайпине. Проектирование, исследование, разработка, а также подготовка гражданского строительства были начаты в полном объеме.

### **2.2. Научные цели**

Нейтрино являются элементарными частицами в Стандартной модели. Существует три разновидности нейтрино, известные как  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ . Нейтринные ароматы являются суперпозициями трех массовых состояний ( $\nu_1$ ,  $\nu_2$  и  $\nu_3$ ), которые подвергаются квантовой интерференции во время перемещения в пространстве, вызывая тем самым изменение аромата нейтрино. Это явление известно как осцилляции или перемешивание нейтрино. Амплитуды колебаний связаны с углами смешивания  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{23}$  и  $\theta_{13}$ . Частоты осцилляций определяются разностью квадратов масс нейтрино,  $\Delta m^2_{ij} = m^2_i - m^2_j$ .

$\theta_{12}$  и  $\Delta m^2_{21}$  были измерены с помощью солнечных и реакторных нейтрино в эксперименте KamLAND.  $\theta_{23}$  и  $|\Delta m^2_{32}|$  были измерены с помощью атмосферных нейтрино и нейтрино из ускорителей. Последний неизвестный угол смешивания  $\theta_{13}$ , определенный из нейтринного эксперимента DayaBay, оказался неожиданно большим. Эти измерения открывают новую эру экспериментов с нейтрино. В новых экспериментах по генерации нейтрино основное внимание будет уделено определению знака  $\Delta m^2_{32}$  (иерархии масс), точному измерению всех осцилляционных параметров и поиску нарушения CP-инвариантности в осцилляциях нейтрино.

Основной целью JUNO является определение иерархии масс нейтрино путем точного измерения энергетического спектра реакторных электронных антинейтрино на расстоянии  $\sim 53$  км от реакторов. Метод относительного измерения, который был разработан на основе интерференции двух различных частотных осцилляционных компонент, зависящих от  $\Delta m^2_{32}$  и  $\Delta m^2_{31}$ , может достигать чувствительности  $\Delta\chi^2 > 16$  в идеальном случае с одним реактором и одним детектором и  $\Delta\chi^2 > 9$  с учетом разброса активной зоны реактора и неточностью детектора (См. Рисунок 1).

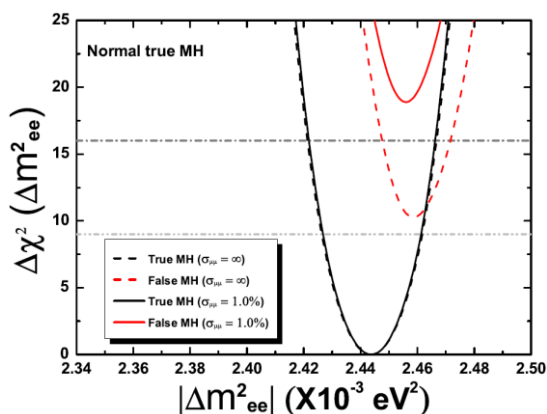


Рисунок 1: График чувствительности определения иерархии масс

Если абсолютное значение  $\Delta m^2_{\mu\mu}$  (которое является приближением  $\Delta m^2_{32}$ ), измеренное из экспериментов на ускорителях, включено с точностью до 1%, то чувствительность определения иерархии масс можно улучшить до  $\Delta\chi^2 > 25$  и  $\Delta\chi^2 > 16$  в теоретическом и экспериментальном случаях соответственно.

JUNO собирается улучшить точность  $\Delta m^2_{21}$ ,  $\Delta m^2_{32}$  и  $\sin 2\theta_{12}$ , чтобы она была меньше 1% (См. Рисунок 2). Принимая во внимание, что точность измерения  $\sin 2\theta_{13}$ , полученная с помощью DayaBay, составляет около 4%, унитарная матрица смешивания нейтрино может быть измерена с точностью до 1%. Кроме того, у JUNO есть и другие научные возможности, такие как изучение сверхновых нейтрино, геонейтрино, солнечных нейтрино, атмосферных нейтрино и экзотические поиски.

	Current	JUNO
$\Delta m^2_{12}$	~3%	~0.6%
$\Delta m^2_{23}$	~5%	~0.6%
$\sin^2\theta_{12}$	~6%	~0.7%
$\sin^2\theta_{23}$	~20%	N/A
$\sin^2\theta_{13}$	~14% → ~4%	~15%

Рисунок 2: Точность осцилляционных параметров

## 2.3. Экспериментальная площадка

JUNO находится в Кайпине, Цзянмэнь, на юге Китая. (См. Рисунок 3) Это примерно в 53 км от АЭС Янцзян и Тайшань, обе из которых находятся на стадии строительства. Планируемая тепловая мощность этих реакторов составляет 36 ГВт. В пределах 200 км нет другой атомной электростанции. Гранитная гора высотой 270 м обеспечивает хорошее экранирование космических мюонов, которые являются основными источниками фона. Для подавления фона, вызванного мюонами, детектор располагается глубоко под землей на глубине 700 м. Строительство эксперимента, началось в 2014 году и завершится по плану в 2020, с учетом постройки туннеля, подземного экспериментального зала, бассейна с водой, центрального детектора, детектора слежения за мюонами и некоторых вспомогательных сооружений.



Рисунок 3: Географическое положение JUNO

## 2.4. Детекторы

Центральный детектор заполнен жидким сцинтиллятором на основе линейного алкилбензола (ЛАБ) на 20 кт (См. Рисунок 4). Когда нейтрино

проходят через детектор, очень малая их часть взаимодействует с жидким сцинтиллятором, создавая сцинтилляционный свет, который можно увидеть с помощью 15000 20-дюймовых фотоумножителей (ФЭУ) с объемным звучанием. Энергия и место взаимодействия падающих нейтрино могут быть восстановлены на основе информации о заряде и времени, полученных от ФЭУ. Энергетическое разрешение примерно обратно пропорционально квадратному корню из числа обнаруженных фото-электронов. Чтобы достичь желаемой чувствительности определения иерархии масс, энергетическое разрешение должно быть менее 3% при 1 МэВ, что соответствует 1200 фото-электронам на МэВ, что намного выше чем у современных детекторов, таких как BOREXINO и KamLAND. Технически сложная задача – это создание нового типа ФЭУ для высокоэффективного и высоко прозрачного жидкостного сцинтиллятора.

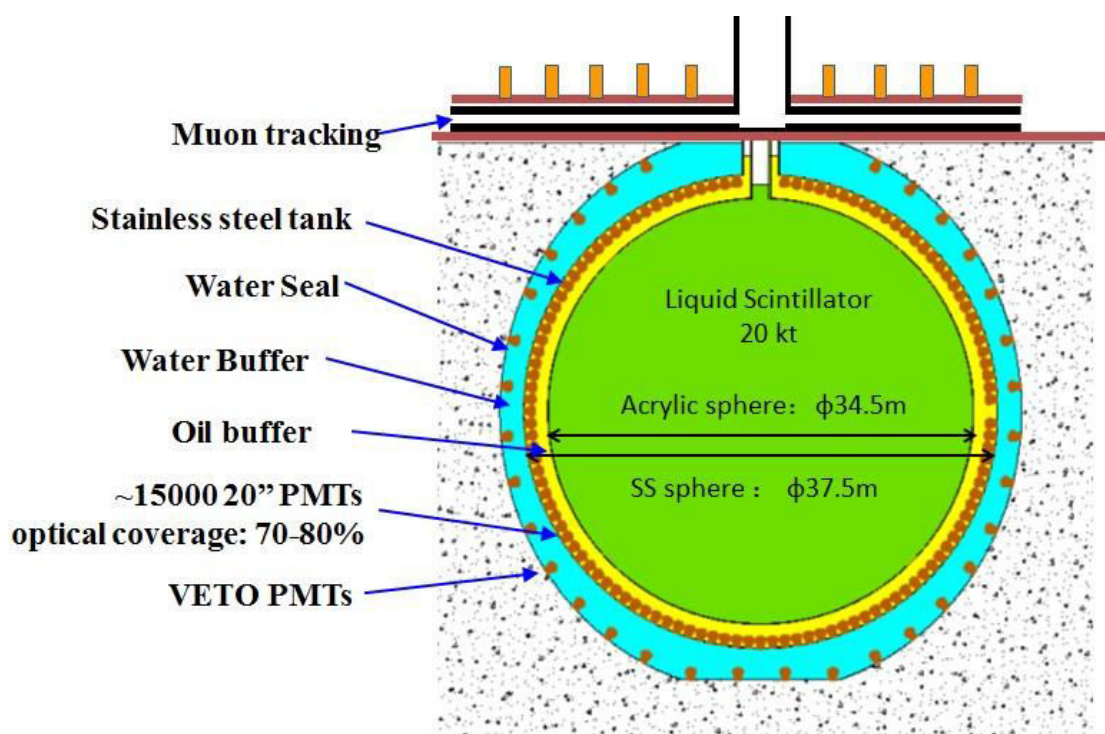


Рисунок 4: Устройство детектора

Водный бассейн защищает центральный детектор от естественной радиоактивности окружающего камня. Благодаря наличию ФЭУ, он также служит в качестве водного черенковского детектора, при помощи которого можно отслеживать космические мюоны. В верхней части бассейна с водой находится еще один детектор отслеживания мюонов, который используется для повышения эффективности обнаружения мюонов.

## **2.5. Регистрация сигналов и фоновое излучение**

В реакции взаимодействия электронного антинейтрино с протоном (обратная реакция  $\beta$ -распада) в жидком сцинтилляторе высвобождается позитрон и нейтрон. Почти вся кинетическая энергия от антинейтрино приходится на позитрон, который быстро переносит энергию, обеспечивает быстрый сигнал. Нейтрон же через среднее время 200 мкс захватывается протоном, а затем в результате  $\gamma$ -излучения выделяется 2,2 МэВ энергии, тем самым создается запаздывающий сигнал. Совпадение быстрых и запаздывающих сигналов является отличительной чертой антинейтрино. Расчетная скорость обратной реакции  $\beta$ -распада составляет ~40 за день.

Радиационный фон является случайной величиной, но он составляет не больше 10% от обратного  $\beta$ -распада и может быть точно измерен из полученных данных.

## **2.6. Организация проекта**

Проект JUNO состоит из 12 подсистем, включая физику и управление, центральный детектор, вето-детектор, изучение и разработка ФЭУ, жидкостный сцинтиллятор, электронику, получение входных данных и систему управления детектором, калибровку, программное обеспечение и вычисление, тестирование и защиту ФЭУ, малые ФЭУ и гражданское строительство. Комитет по управлению проектом состоит из менеджера,

главного инженера по качеству, главных инженеров, общих технологов, главного экономического менеджера, офис-менеджера и менеджеров 12 подсистем. Регулярно проводятся заседания комитета управления и каждой подсистемы управления и исследований. Заседания по международному сотрудничеству проводятся каждые полгода. В то же время, множество инструментов коммуникации созданы со списками рассылки, базой документов, официальным публичным и внутренним веб-сайтом и т.д.

В коллаборации JUNO более пяти лет участвует Объединенный институт ядерных исследований. В лаборатории ядерных проблем (ЛЯП) разрабатывают различные методы тестирования ФЭУ. Здесь разработали и полностью выполнили сканирующую установку, с помощью которой можно получить в полном объеме характеристики поверхности фотокатода ФЭУ. Другим вкладом ЛЯП является разработка систем высоковольтного питания, а также разработка и создание магнитной защиты.



## Список литературы

1. <http://juno.ihep.cas.cn/>
2. Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Юдин Н.П. Частицы и атомные ядра. – М.: Едиториал УРСС, 2007. - 584 с.
3. Капитонов И.М. Введение в физику ядра и частиц. – М.: Едиториал УРСС, 2002. - 384 с.
4. <http://www.jinr.ru/posts/oiyai-v-proekte-juno/>
5. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/mirrors/m047.html>
6. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/spargalka/009i.htm>