



ФИЗИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ  
МГУ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА

*teach-in*  
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

# НАУЧНЫЕ ДОКЛАДЫ

СИБИРЯКОВ СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ  
РАНУЧЧИ ДЖОАКИНО  
ШИФМАН МИХАИЛ АРКАДЬЕВИЧ

---

ФИЗФАК МГУ

---

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН  
СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ  
ПРОФ. РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ  
СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ.  
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ  
НА [VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

ЕСЛИ ВЫ ОБНАРУЖИЛИ  
ОШИБКИ ИЛИ ОПЕЧАТКИ,  
ТО СООБЩИТЕ ОБ ЭТОМ,  
НАПИСАВ СООБЩЕСТВУ  
[VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).



БЛАГОДАРИМ ЗА ПОДГОТОВКУ КОНСПЕКТА  
СТУДЕНТА ФАКУЛЬТЕТА ВМК МГУ  
**АХМАДЕЕВА ИЛЬДАРА ИЛНУРОВИЧА**



# Содержание

<b>1</b>	<b>Лекция 1. Вторая жизнь квантовой теории поля</b>	<b>4</b>
1.1	Начало квантовой теории поля . . . . .	4
1.2	Развитие квантовой теории поля в послевоенное время . . . . .	6
1.3	Начало второй жизни квантовой теории поля . . . . .	6
1.3.1	Первая стадия . . . . .	6
1.3.2	Вторая стадия . . . . .	7
1.4	Суперсимметрия и теория струн . . . . .	8
1.5	Конфаймент . . . . .	9
1.6	Четырёхмерная теория сильной связи . . . . .	10
1.7	Новые методы изучения сильной связи . . . . .	10
1.8	Карта теории физики высоких энергий . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Лекция 2. Насколько лёгкой может быть темная материя и как её искать</b>	<b>12</b>
2.1	Экспериментальные данные указывающие на наличие тёмной материи	12
2.2	Единицы измерения в астрономии . . . . .	15
2.3	Идеи формирования темной материи . . . . .	15
2.4	Виды лёгкой темной материи . . . . .	16
2.4.1	Два режима поведения скалярного поля . . . . .	18
2.5	Оценка структуры гало . . . . .	20
2.5.1	Изучение структуры лёгкой материи . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Лекция 3. Физика нейтрино и астрофизика</b>	<b>22</b>
3.1	JUNO experiment . . . . .	22
3.2	A large LS detector . . . . .	23
3.3	Approach to infer the Mass Hierarchy . . . . .	24
3.4	Neutrino and positron spectra . . . . .	26
3.5	Supernova neutrinos . . . . .	30
3.6	Solar Neutrinos . . . . .	31
3.7	Proton decay . . . . .	32
3.8	JUNO electronics layout . . . . .	33

# Лекция 1. Вторая жизнь квантовой теории поля

Квантовой теории поля уже более 90 лет и до сих пор в природе на фундаментальном уровне не наблюдалось ни одного физического явления, которое не описывалось бы квантовой теорией поля. Это самая фундаментальная известная на сегодняшний день область.

## Начало квантовой теории поля

В начале XX века произошли две революции, которые перевернули знание о мире. Первая революция – это специальная и общая теории относительности Эйнштейна. Вторая революция – это квантовая теория, квантовая механика.

Квантовая механика возникла в начале XX века. Сначала это была упрощённая квантовая механика Бора-Зоммерфельда, далее – объяснение фотоэффекта, предложенное Эйнштейном и выведенное Максом Планком.

Основная революция произошла в начале двадцатых годов. С этой революцией ассоциируются имена Гейзенберг и Шредингер. Квантовая теория поля уже не была революционной, потому что складывалась как задача соединения квантовой механики и теории относительности. Уже в 1926 году квантовая механика была применена к процессу излучения фотонов.

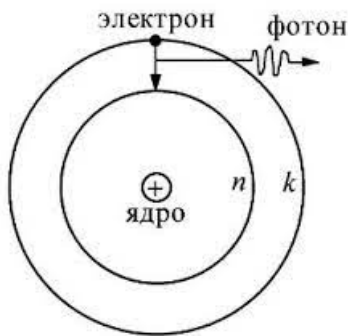


Рис. 1.1. Изображение атома водорода и переход с возбужденного состояния в основное с излучением фотона

Электроны находятся в квантовых состояниях т.е. основной уровень, 1-е возбуждение, 2-е возбуждение, что соответствует квантовой механике, так как в классической механике нет состояний. Отсутствие состояний в классической механике приводило к нестабильности атомов.

Введение квантовой механики – это предотвращение распада атомов и их нестабильности. Первая работа, в которой рассматривался фотон написана 1926 году Борном, Гейзенбергом и Йорданом. Они описали электромагнитное поле.

### Историческая справка

*Борн и Гейзенберг на момент начала XX века были уже известны, Йордан был малоизвестным молодым физиком. Он считался восходящей звездой теоретической физики и на него возлагались большие надежды. Свою карьеру учёный разрушил, когда вступил в национал-социалистическую немецкую рабочую партию (нацистская партия) в 1933 году, когда Гитлер пришёл к власти. Когда война закончилась ему было трудно восстановиться на академическую работу, после восстановления он не мог “догнать” современную послевоенную физику и вскоре ушёл в послевоенную немецкую политику. Его имя осталось только в математике (Йорданова алгебра).*

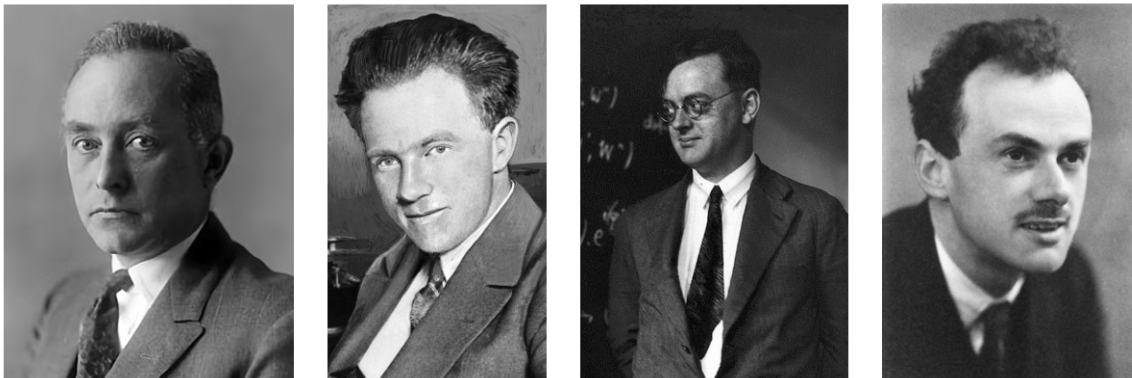


Рис. 1.2. Основатели современной квантовой теории поля Макс Борн, Вернер Гейзенберг, Паскуале Йордан и Пол Дирак

Пол Дирак – английский физик. Он был первым, кто рассмотрел взаимодействия электронов с квантами света и написал уравнение для поведения электронов в 1927 году (Уравнение Дирака).

Последние штрихи на квантовой теории поля были добавлены в работах Гейзенберга и Паули. Они вывели, что не только электрон и фотон следует рассматривать как кванты поля, но и любые микрочастицы такого типа (протоны, нейтроны).

## Развитие квантовой теории поля в послевоенное время

После войны кардинальные продвижения теории поля произошли благодаря двум людям – Ричарду Фейнману и Льву Давидовичу Ландау.

Фейнман родился в 1918 году. В послевоенное время получил должность в Корнельском университете. Он вывел решение для возникающей бесконечности в результате вычислений в квантовой электродинамике. Его вывод состоял в том, что в квантовой электродинамике, если делать вычисления для физических наблюдаемых величин и выражать их результаты через физический наблюдаемый заряд электрона, то никаких бесконечностей не будет, они появляются только на промежуточных этапах. Также он придумал очень простой язык для описания этих вычислений – **диаграмма Фейнмана**.

Следующий прорыв произошел благодаря Ландау в 1953-1954 годы. Он пришел к выводу, что в квантовой электродинамике на фундаментальном уровне существует проблема, названная **нулем заряда**. Проблема состояла в том, что если взять любой заряд на очень малых расстояниях, ввести пробные электрон и позитрон и развести их на очень большие расстояния, то заряд постепенно уменьшается до нуля. Или если взять заряд на больших расстояниях и потом свести пробные заряды на малые расстояния, то заряд взрывается – это явление стало называться **полюсом Ландау**. Ландау пришёл к выводу, что из-за этого явления квантовая теория поля умерла.

Данная трудность не была решена, и на этом закончилась первая жизнь квантовой теории поля. Ученые получали результаты, сравнивали с экспериментальными данными, результаты сходились, но теоретически обосновать не получалось. Ученые, изучающие квантовую теорию поля переходили в другие области. Вследствие поставленного итога Ландау, о том, что квантовая теория поля умерла, исследователи перестали заниматься квантово-полевыми подходами. Как результат такого перехода возникает теория Редже, из которой в конце 60-х годов сформировалась теория струн в виде **амплитуды Венециана**.

## Начало второй жизни квантовой теории поля

### Первая стадия

Начало второй жизни произошло с открытия Янгом и Миллсом теории, обобщающей квантовую электродинамику. В квантовой электродинамике переносчиком взаимодействия между электронами является единственный нейтральный фотон.

Обобщение квантовой электродинамики состоит в том, что принципы её построения такие же: есть поля материи протон, электрон, нейтрон, которые состоят из кварков, а вместо зарядов выступает цвет. Взаимодействия между кварками, осуществляется обменом 8 частиц со спином, равным 1. Каждый кварк может быть в трёх цветовых состояниях. Взаимодействие между кварками, или взаимодействия между электронами, осуществляется через передачу более сложных объектов – калибровочных бозонов, которые также имеют цвет.

Настоящим открывателем теории Янга-Миллса считается Паули. Он пришёл к теории со стороны геометрических соображений примерно за год до её открытия, но побоялся её печатать, так как не был уверен в правильности предсказания существования калибровочных бозонов или глюонов, которые вследствие своей безмассовости не могли быть обнаружены в экспериментах.

Следующий критический шаг – работа Дэвида Гросса, Фрэнка Вилчека и Дэвида Полицера (1973 г). В работе проанализирована теория Янга-Миллса, рассмотрена проблема в нулём заряда и катастрофа со взрывом заряда с полюсом Лаундау.

Они обнаружили, что нуля заряда нет, а вместо нуля заряда имеется обратное поведение. При приближении пробных зарядов всё ближе и ближе, то заряд медленно спадает, но не обращается о ноль. Данная теория полностью согласована. На этой теории завершается первая стадия начала второй жизни квантовой теории поля.

## Вторая стадия

1) **Открытие суперсимметрии**, первооткрыватели суперсимметрии – это Юрий Гольфанд и Евгений Лихман. Суперсимметрия (геометрическая симметрия) обобщает симметрию пространства. Пустое пространство симметрично – обладает симметрией относительно сдвигов в пространстве т.е. может сдвинуться из одной точки в другую без каких-либо изменений. Начало отсчета времени также не имеет значения, а важен только интервал времени.

На данную тему представлена **no-go теорема** (теорема не пройдёшь), согласно которой никаких других геометрических симметрий в природе не существует. Эту теорему доказал Колман и Мандула.

Гольфанд и Лихман обнаружили, что есть ещё дополнительная геометрическая симметрия, которая генерируется фермионами-операторами (неклассическая теория).

Спустя два года суперсимметрия была переоткрыта Юлиусом Вессом и Бруно Zumino в Церне. Далее последовал лавнообразный выпуск работ на эту тему, и на

сегодняшний день слово "суперсимметрия" фигурирует примерно в 50 000 опубликованных работ.

Весс, Бруно и Салам придумали индустриальный метод и объяснили причину существования дополнительной суперсимметрии. Существование суперсимметрии приводит к увеличению количества координат (добавление квантовых координат).

2) Параллельно с этими событиями произошел сдвиг в концепции квантовой теории поля, и некоторые ключевые проблемы стали техническими. Так Фейнмановская проблема с бесконечностями, теперь не является проблемой, бесконечных энергии или бесконечно малых расстояний не существует. Есть предельное расстояние, названное **длиной планка** равное  $10^{-33}$  см и известные законы сегодня должны применяться на этих расстояниях.

3) Предполагалось, что в квантовой теории поля вакуум единственен и уникален, и на этом была построена аксиоматическая теория поля. Теперь известно, что это не так. Вакуум – это наинизшее энергетическое состояние по теории поля. Наинизших состояний много, они могут быть либо вырождены по энергии, либо не совсем вырождены (квазистационарные состояния).

## Суперсимметрия и теория струн

Теория струн и суперсимметрия возникли в середине 80-х годов. В случае суперсимметрии ожидалось, что у каждой известной частицы будет суперпартнёр, который похож во всём на частицу, включая массу, вес и т.д., за исключением спина. Если обычная частица имеет целый спин, то суперпартнёр полуцелый. Например фотон имеет целый спин, а фатина спин  $1/2$ , или электрон имеет спина  $1/2$  его суперпартнер сэлектрон имеет спин 0. Вследствие этой теории была выдвинута проблема экспериментальной физики – **проблема иерархии** – в природе всё должно быть естественно, не может быть особо больших и особо маленьких чисел, все отношения должны быть порядка единицы или близки к единице.

Теория струн должна была трактоваться как теория всего, объясняющая все природные явления. Теория всего создана не была, суперсимметрия также была закрыта, так как на современных ускорителях следа суперсимметрии обнаружено не было. Строительство нового ускорителя с большими энергиями невозможно вследствие его дороговизны.

Однако теория струн и суперсимметрия оказались полезными инструментами для решения задач теории поля сильной связи. Теорий с сильной связью достаточно



много, особенно в области физики конденсированного состояния и физики высоких энергий.

## Конфаймент

Конфаймент – это явление невылетания кварков или невылетания цвета. Вся материя состоит из атомов, внутри которых находится ядро, состоящее из протонов и нейтронов. Каждый протон и нейтрон состоит из трёх кварков, благодаря тому, что он состоит из нечётного числа кварков, мир существует стабильно и ничего не рассыпается. С другой стороны кварки не наблюдались природе прямо. Данное явление называется конфаймент. Кварки заключены в "тюрьму" из протонов и нейтронов, внутри них они свободны и не взаимодействуют, но как только долетают до "стен тюрьмы" выйти наружу не могут. Единственный аналог теории конфаймента найден в физике.

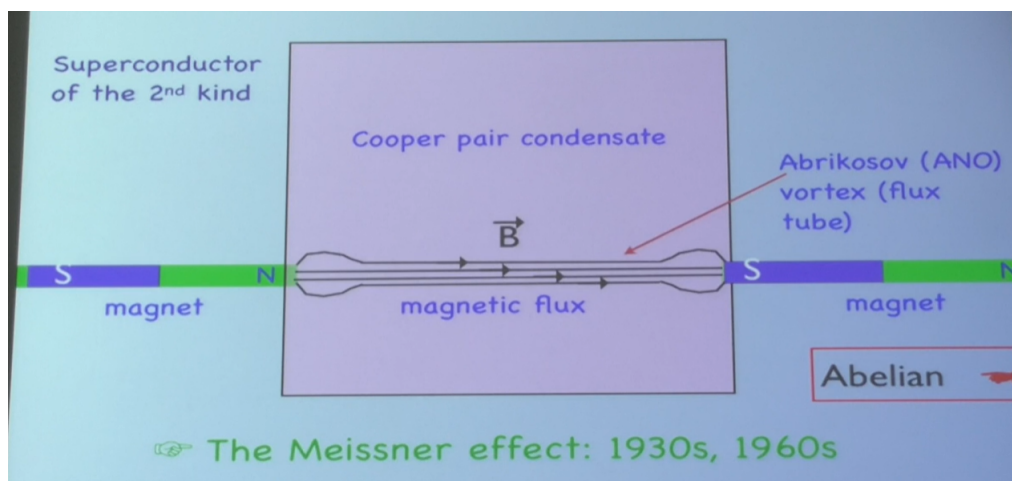


Рис. 1.3. Суперпроводник в сильном магнитном поле

Розовым цветом изображён образец суперпроводящего материала. При низкой температуре проводимость материала становится бесконечно большой, это явление известно с начала XX века. В конце 20-30-х годов немецкий физик Вальтер Майснер обнаружил что, если поместить суперпроводник в магнитное поле, то магнитное поле внутрь не проникает (при малых размерах магнитное поле огибает суперпроводник). Если образец большой, то полю энергетически невыгодно обходить образец, так как при сильном удлинении магнитных линий сильно растёт энергия системы.

Алексей Абрикосов выдвинул идею, что если суперпроводник большой, то магнитные линии должны либо замкнуться на противоположном полюсе, либо уйти в

бесконечность. Но уход в бесконечность это большая потеря энергии. Следовательно, внутри суперпроводника в магнитном поле образуется узкая трубка между северным и южным полюсами и весь магнитный поток коллимируется внутри трубки, которая имеет постоянный поперечный размер и постоянную напряженность. Если попытаться развести северный и южный полюса, то потребуется бесконечная энергия т.к. энергия состояния будет расти линейно с расстоянием.

Спустя 20 лет Натан Зайберг и Эдвард Виттен доказали справедливость выдвинутых гипотез. Данная теория – это суперсимметричное обобщение квантовой электродинамики. Они добавили к электродинамике (в которой есть фотон и электрон) еще некоторые частицы и суперсимметризовали это, т.е. вместе с каждой частицей шёл её партнёр. Теория называется  $N=2$ , что означает что в ней было 8 суперзарядов. Зайберг и Виттен доказали, что в некотором пределе сильной связи между кварком и антикварком натягивается трубка из электрического поля. Данная теория – первое аналитическое доказательство явления комфаймента.

## Четырёхмерная теория сильной связи

В этой теории доказывается существование трубок (вихрей). Данная теория сильно связанная, также как и теория Янга-Миллса.

Сильно связанные двумерные теории можно точно решить, далее с помощью суперсимметрии доказывается, что целый ряд предсказаний в двумерной теории точно соответствует для величин в четырёхмерной теории.

## Новые методы изучения сильной связи

Сейчас происходит рассвет второй жизни квантовой теории. Выдвигаются новые методы сильной связи.

- 1) Открыты новые аномалии (1-form аномалии) и их следствия.
- 2) Найдены неожиданные подавления энергии вакуума по  $\frac{1}{N}$  в несуперсимметричных теориях.

## Карта теории физики высоких энергий

Географическая привязка не имеет отношения к делу. На Аляске (2) цветёт математическая физика. Астрофизика (космология) находится в Гренландии (1), она

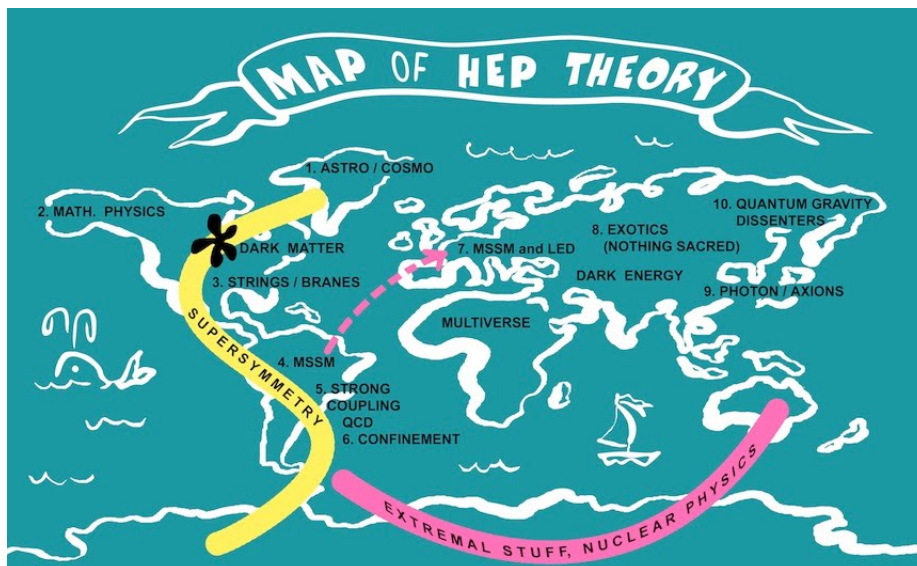


Рис. 1.4. Карта теории физики высоких энергий

сейчас цветёт гораздо более сильнее чем 10 лет назад (новые результаты, эксперименты, изобретаются новые телескопы, недавно обнаружены гравитационные волны). Диссиденты квантовой гравитации (10), квантовая гравитация ещё не создана. Аксионная физика (9). Проблема тёмной энергии (8) и тёмной материи Суперсимметрия (4) – суперсимметричная стандартная модель, на данный момент не развивается. Теория сильной связи (5) и конфайнмент (6). Проблема конфайнмента развивается, но медленно. В сердце континента теория струн (3). За последние десять лет ветвь теории, направленная на создание теории всего полностью исчезла. Струны остались только как математический аппарат для задач с сильной связью. Новые пальмы в Антарктиде – это квантовая теория поля, получившая вторую жизнь и активно развивающаяся сейчас.

## Лекция 2. Насколько лёгкой может быть темная материя и как её искать

### Экспериментальные данные указывающие на наличие тёмной материи

- 1) Вращательные кривые галактики. Обычно это дисковые галактики. В дисковой галактике есть звёзды и газ, и мы можем измерить скорость вращения звезд вокруг центра в зависимости от расстояния. Известно, что у галактики вся масса сконцентрирована внутри, это доказывается её светимостью. На периферии галактики скорость определяется законом Ньютона.

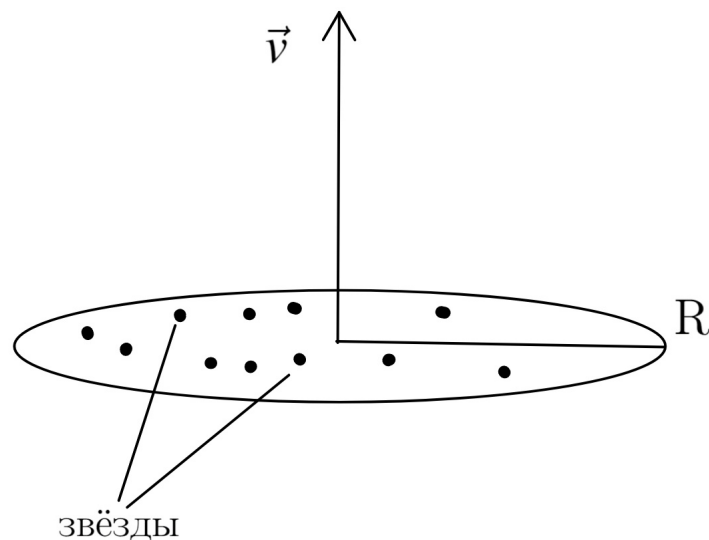


Рис. 2.1. Диск вращения галактики

$$\frac{GM}{r^2} = \frac{v^2}{r}$$

$$v^2 \sim \frac{1}{r}$$

- 2) Скопление галактик, которые образовались из слияния других скоплений.

Между двух скоплений находится газ. Распределение массы в этом скоплении соответствует распределению галактик т.е. существует некая материя, которая

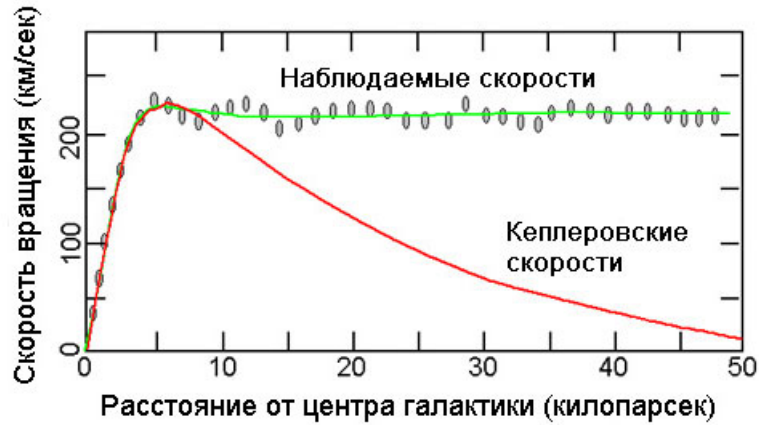


Рис. 2.2. Теоретический (сплошная) и экспериментальный (пунктирная) графики зависимости квадрата скорости от радиуса галактики

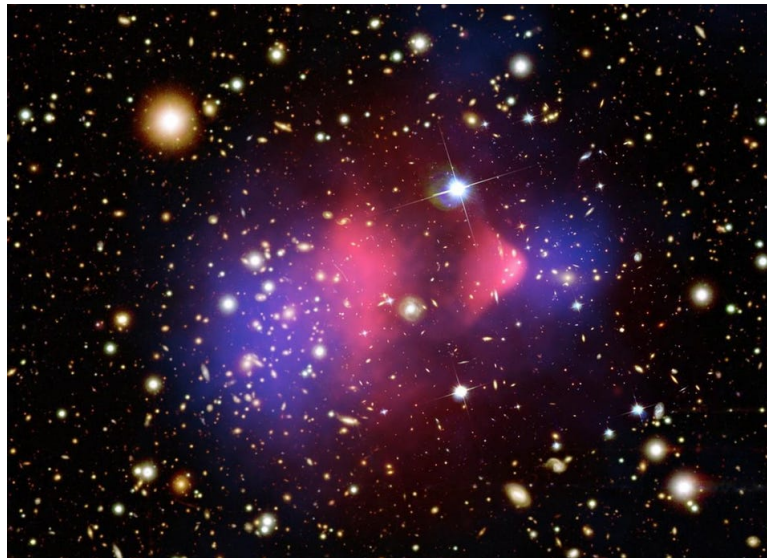


Рис. 2.3. Скопление галактик Пуля

не светится и ни с чем не взаимодействует. Например, скопление галактик Пуля (Bullet cluster).

Фиолетовым изображается полная масса, розовым – горячий газ (рентгеновское излучение).

- 3) Распределение температуры реликтового излучения по спектру.

$$\frac{\delta T}{T} \text{ — Реликтовое излучение}$$

Считается, что это излучение происходит от ранних этапов расширения вселенной (с тех времен, когда вселенная была горячей).

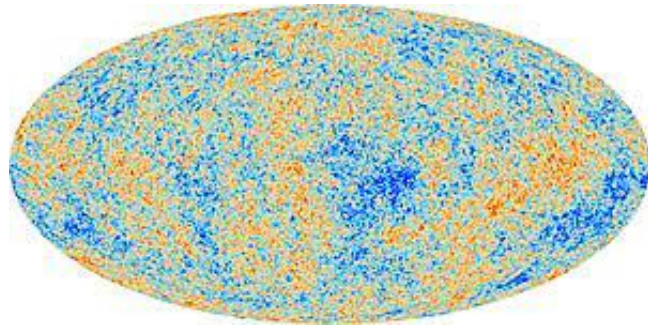


Рис. 2.4. Реликтовое излучение

Разным цветом помечена температура реликтового излучения в разных точках. В среднем температура равна 3 К, уровень флуктуации температуры находится в диапазоне 100 мкК. Профиль температуры соответствует звуковым полям в горячей плазме. Для объяснения данных требуется холодная темная материя.

Согласно экспериментальным данным, доля темной материи в полном балансе массы во вселенной составляет 25%. Доля всех барионов во вселенной равна 5%, следовательно, темная материя доминирует.

Кроме реликтового излучения также наблюдается распределение разных галактик во вселенной. На изображении каждая точка – галактика. Данной структуры не образовалось бы без тёмной материи.

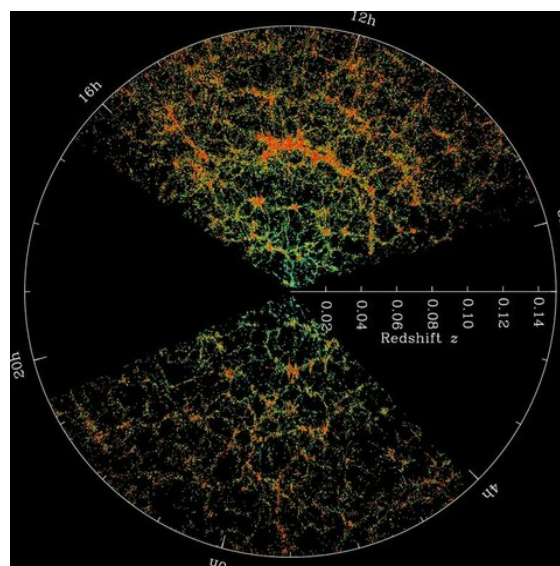


Рис. 2.5. Распределение галактик во вселенной

## Единицы измерения в астрономии

- 1) **Расстояние.** Расстояние принято измерять в парсеках (pc). 1 парсек = 3 световых года.

$$1 \text{ pc} \sim 3 \times 10^{18} \text{ см}$$

1 – 10 kpc – размер видимой части галактики

100 kpc – 1 Mpc – размер гало галактики

- 2) **Масса.** Так как имеем дело с физикой частиц, то работаем в системе измерения, где  $\hbar = c = 1$ .

$$m \sim 1 \text{ eV}$$

$$1 \text{ eV} \sim 1.78 \times 10^{-3} \text{ g}$$

$$eV^{-1} \sim 2 \times 10^{-5} \text{ см} \sim 7 \times 10^{-16} \text{ s}$$

$$M_{\odot} = 2 \times 10^{33} \text{ g} - \text{масса Солнца}$$

- 3) **Плотность.**

$$\rho \longleftrightarrow \frac{\text{GeV}}{\text{cm}^3}, \frac{M_{\odot}}{\text{pc}^3}$$

$$1 \frac{\text{GeV}}{\text{cm}^3} \sim 0.026 \frac{M_{\odot}}{\text{pc}^3}$$

$$\rho \sim 0.3 \div 0.4 \frac{\text{GeV}}{\text{cm}^3} - \text{плотность темной материи галактики в районе Земли}$$

Факты о тёмной материи: она существует, она гравитационно доминирует с обычной материей, но не взаимодействует ни с ней ни сама с собой. Темная материя – это некий газ бесстолкновительных частиц. Разброс массы тёмной материи приблизительно 80 порядков.

## Идеи формирования темной материи

- 1) Слабо взаимодействующие массивные частицы (WIMP – Weakly Interacting Massive Particles). Идея состоит в том, что материя – это слабо взаимодействующие массивные частицы. Масса частиц тяжелее массы барионов, взаимодействие с барионами слабое. Рождение массивных частиц во вселенной происходит через столкновение между собой частиц стандартной модели, которое рождает частицы темной материи. Данная гипотеза на данный момент не подтверждена.

$$m \sim 10 \text{ GeV} \div 10 \text{ TeV} - \text{масса частицы}$$

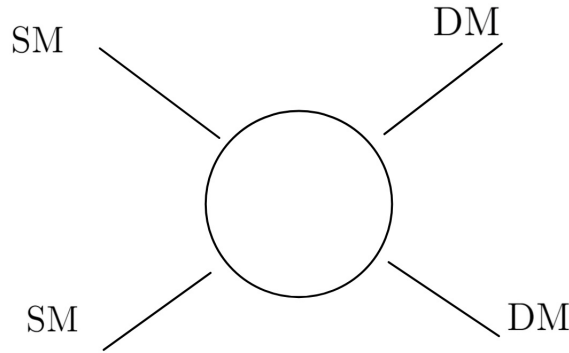


Рис. 2.6. Столкновение частиц стандартной модели, появление тёмной материи

- 2) Согласно идеи материи из слабо взаимодействующих массивных частиц, последние ограничены по массе. На самом деле частицы могут быть с массой намного больше  $10 \text{ TeV}$ , а именно  $10^{19} \text{ GeV}$  – **WIMPZILLA's**.
- 3) Тёмная материя может состоять из черных дыр с массой сравнимой со  $100 M_{\odot}$ .

### Виды лёгкой темной материи

- 1) **Фермионная тёмная материя.** Фермионы отличаются от бозонов тем, что их нельзя сжать до бесконечности согласно принципу Паули.

$$\rho \leq m \int_0^{\rho_{max}} \frac{d^3\rho}{(2\pi)^3} = \frac{4\pi}{3(2\pi)^3} m^4 v_{max}^3$$

Так как у галактики конечный гравитационный потенциал, то кинетическая энергия, связанная со скоростью галактики должна быть меньше характерной потенциальной энергии в галактике.

$$v_{max}^2 \leq \frac{GMm}{R}$$

$$M \sim \frac{4\pi}{3} \rho R^3$$

$$m \geq \left(\frac{4\pi}{3}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{1}{(GR^2v)^{\frac{1}{4}}}$$



Подставим численные значения, характерные для галактики:

$$v = 30 \frac{km}{s}$$

$$R \sim 1kpc$$

$m \sim 170eV$  – нижнее ограничение на массу фермиона тёмной материи

2) **Бозонная тёмная материя.** Бозонная темная материя намного легче фермионной.

$$m \ll 1$$

Рассматриваем свободное массивное скалярное поле. Запишем действие над полем.

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left( \frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \varphi \partial_\nu \varphi - \frac{m^2 \varphi^2}{2} \right)$$

$$\int d^4x \sqrt{-g} \left( \frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \varphi \partial_\nu \varphi - \frac{m^2 \varphi^2}{2} \right) = \frac{1}{\sqrt{-g}} \partial_\mu (\sqrt{-g} g^{\mu\nu} \partial_\nu \varphi) + m^2 \varphi = 0 \quad (2.1)$$

Записанное уравнение – это простейшая модель тёмной материи. В данном случае выбрано скалярное поле вследствие его простоты вычисления. Лёгкие скалярные поля часто возникают в теории струн.

$$U(\varphi) = \mu^4 \left( \cos \frac{2\pi\varphi}{\Lambda} - 1 \right) - \text{Периодический потенциал}$$

где  $\Lambda$  – характерный масштаб теории струн  $10^{16} - 10^{17} GeV$ ,  $\mu$  – экспоненциально малое число.

Представим, что есть вселенная и в ней есть однородное поле выражения 2.1.

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) d\vec{x}^2$$

$$\frac{1}{a^3} \frac{\partial}{\partial t} (a^3 \dot{\varphi}) + m^2 \varphi = 0$$

$$\ddot{\varphi} + 3H\dot{\varphi} + m^2 \varphi = 0$$

где  $H$  – постоянная Хаббла.

$$H = \frac{\dot{a}}{a}$$

## Два режима поведения скалярного поля

а)  $m < H$ . Вселенная расширяется быстро, по сравнению с массой скалярного поля.

$$\varphi = const$$

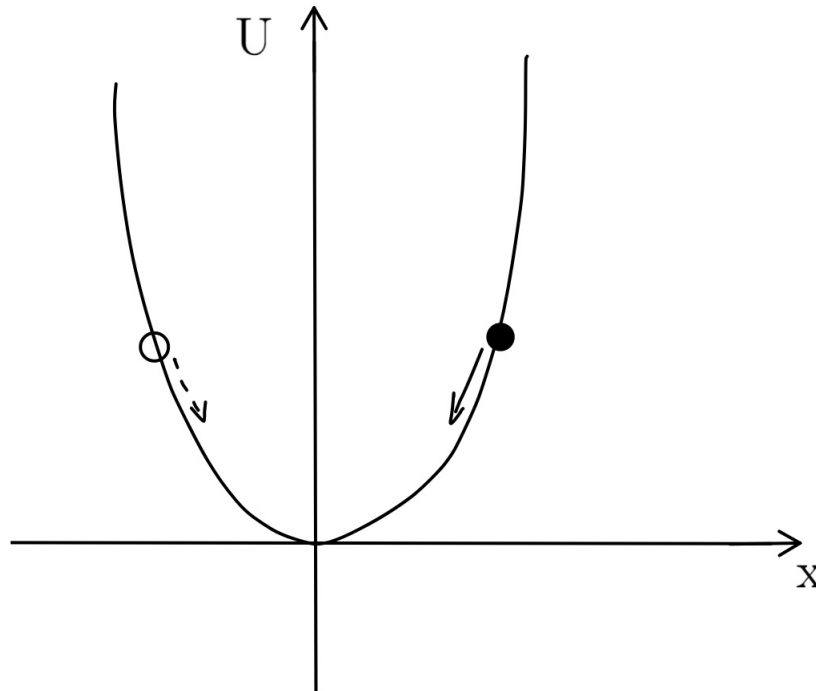


Рис. 2.7. Осцилляции потенциала в координатах

б)  $H < m$ . Поле начинает осциллировать.

$$\varphi = f(t)\omega(mt)$$

$$\rho = \frac{m^2 f^2}{2^n}$$

$$p = -\rho \cos(2mt)$$

Осцилляции приводят к изменению давления, при неизменной плотности. Усредненное по времени осцилляций равно нулю.

$$f \propto \frac{1}{a(t)^{\frac{3}{2}}} - \text{изменение амплитуды флуктуаций со временем}$$

Механизм генерации: вначале поле находится в любом месте пространства. В случае, если поле произошло от периодического потенциала, оно находится внутри периода на расстоянии до ближайшего минимума порядка  $\lambda$ . До тех пор, пока расширение меньше массы поля, оно статично. После оно начинает осциллировать и вести себя как тёмная материя.

Доля тёмной материи в полном балансе массы во вселенной (ultra light dark matter) :

$$\Omega_{ULDM} \sim 0.05 \left( \frac{f_0}{10^{17} \text{GeV}} \right)^2 \left( \frac{m}{10^{-22} \text{eV}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

**Замечание:** если поле однородно распределено во вселенной, то оно ведёт себя как темная материя. Для того, чтобы доказать, что поле является темной материей оно должно скапливаться в галактиках и создавать правильный профиль гало.

### Доказательство

Градиент поля равен нулю, но за счёт гравитационной нестабильности возникают структуры конечного размера, что ведет за собой изменение градиента поля.

$$\varphi = \psi(x, t)e^{-imt} + h.c. - \text{форма поля}$$

где  $\psi(x, t)$  – функция от координаты и времени,  $e^{-imt}$  – быстро осциллирующий фактор.

Приближение малых частот:

$$\dot{\psi} \ll m\psi$$

$$\ddot{\psi} \ll m\dot{\psi}$$

Без учёта малых членов, получаем уравнение Шредингера для волновой функции в гравитационном потенциале:

$$\begin{cases} -i\dot{\psi} - \frac{\Delta}{2m}\psi + m\psi = 0 \\ \Delta\Phi = 4\pi G|\psi|^2 \end{cases}$$

где  $\Phi$  – ненулевой гравитационный потенциал

Для того, чтобы убедиться, что выведенная динамика похожа на динамику частиц запишем преобразование Маделунга.

$$\psi \leftrightarrow \rho, \vec{v}$$

$$\psi = \sqrt{\rho}e^{i\theta}, \vec{v} = \frac{\vec{\Delta}\theta}{m}$$

$$\Delta\Phi = 4\pi r\rho$$

$$\begin{cases} \dot{\rho} + \delta_i(\rho \vec{v}^i) = 0 \\ \dot{v}^i + (\vec{v}\vec{\Delta})v^i + \delta_i = \frac{1}{2m^2}\delta^i\left(\frac{\Delta\sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}}\right) \end{cases}$$

$$\frac{1}{2m^2}\delta^i\left(\frac{\Delta\sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}}\right) - \text{Квантовое давление}$$

Квантовое давление препятствует образованию ("схлопыванию") структур частиц гравитационного взаимодействия.

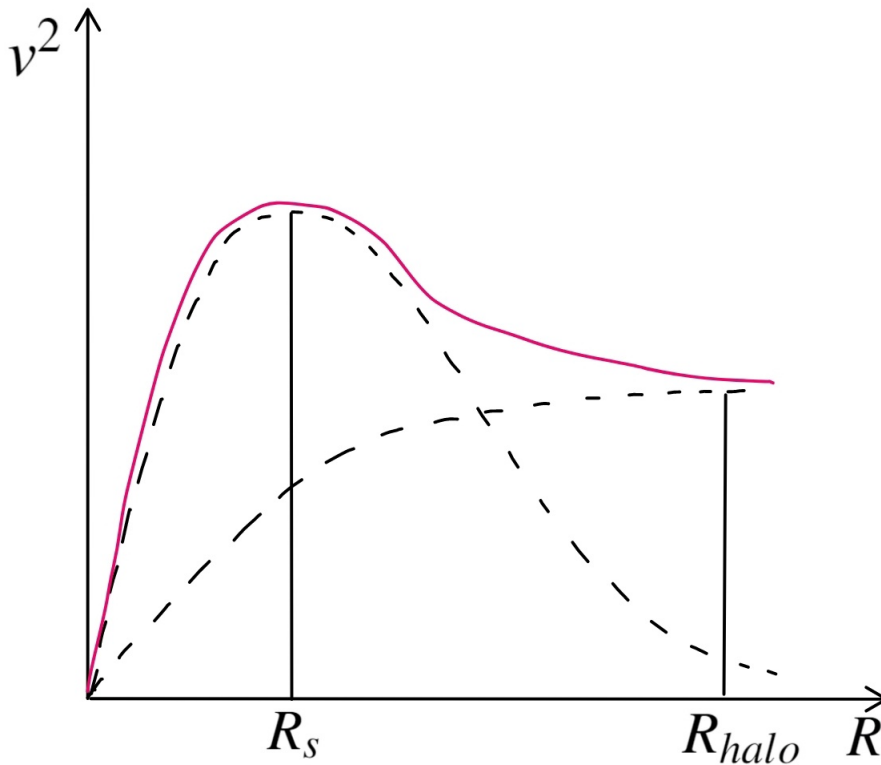


Рис. 2.8. Кривая вращения гало тёмной материи и солитона Сначала доминирует вклад солитона, потом доминирует вклад темной материи

### Оценка структуры гало

Если есть гало из тёмной материи, то должна выполняться теорема Вилеала – потенциальная энергия порядка кинетической.

$$\begin{cases} \frac{GM}{R} \sim v^2 \\ mvR \geq 1 \end{cases}$$

$$\frac{1}{mv} - \text{длина волны частиц гало}$$

$$m \geq \frac{1}{\sqrt{GMR}} \sim 10^{-23} eV$$

Бозонная темная материя не может быть легче  $10^{-23} eV$ .

В центре гало образуется когерентное состояние поля – **СОЛИТОН**, не меняющее свою форму за счет гравитационного потенциала.

$$M_{\text{солитон}} \propto M_{\text{гало}}^{\frac{1}{3}}$$

Зная структуру солитона, кривая вращения будет выглядеть следующим образом

### Изучение структуры лёгкой материи

- 1) Изучение области Млечного Пути.
- 2) Изучение структуры более ранней вселенной.

## Лекция 3. Физика нейтрино и астрофизика

### JUNO experiment

The initial concept behind the JUNO experiment is mainly determination of the neutrino mass hierarchy with a large mass liquid scintillation detector, which is located at medium distance (few tens of km) from a set of high power nuclear reactors. It is also an experiment about astroparticle. In addition, precise measurements of oscillation parameters can be performed in order to test the unitarity of the neutrino oscillation matrix.

The distance of the experiment from the reactor is shown on the X-axis, and the Y-axis shows the ratio between observed and expected count rate. In practice the oscillation phenomenon means that detecting antineutrinos from reactor, the oscillation which converts such electron antineutrinos to  $\tau$  or any other flavor is such that at the certain distance from the reactor this phenomenal conversion is sizable enough to depress the counter rate in the detector. There is a distance so called magic distance which has maximal effect. By purpose choice JUNO is located just at this distance from the reactor which is exactly between 50-60 km, precisely 53 km.

Residual atmospheric effect can be studied which is about arrival of mass hierarchy of neutrino particle. There are several other experiments listed starting from the most recent:

- 1) Mass hierarchy
- 2) Precision measurement of 3 mixing parameters
- 3) Supernovae neutrino
- 4) Geoneutrino
- 5) Sterile neutrino
- 6) Atmospheric neutrinos
- 7) Nucleon Decay
- 8) Exotic searches

The way to this experiment was paved by measuring one important parameter. The dimension is very challenging due to 20 kton LS detector which is much larger than any other instrument. The energy resolution that is 3% is the greatest challenge technically

speaking of the experiment. It is one of the greatest challenge because the low resolution of liquid scintillator makes it difficult to reach such level of resolution. Most of the technical development of the experiment is devoted to assure that this level of resolution can be achieved.

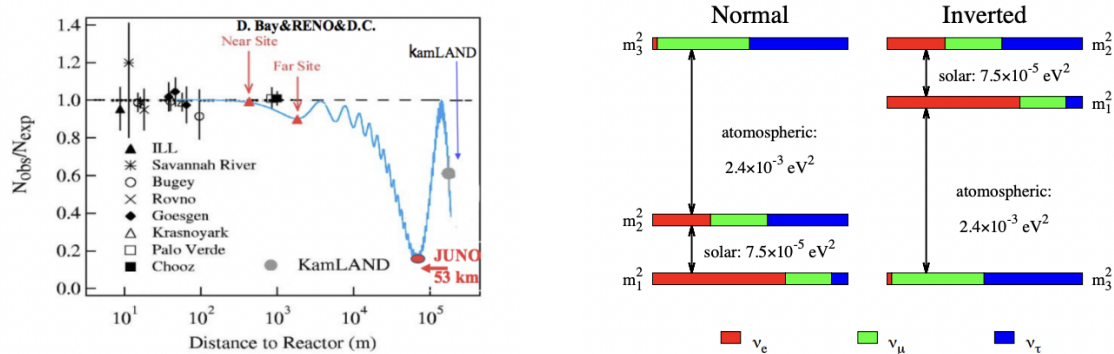


Рис. 3.1. JUNO experiment

## A large LS detector

The concept of the detector is very simple. The idea is to put together the large mass of liquid scintillator in the simplest arrangement in order to get a large volume of liquid scintillator contained in a spherical detector. The spherical detector is huge. In total we have about 18000 PMTs which observe the scintillation light from this volume liquid scintillator. Stainless steel tank is no more existing. The dimension of the system is limited to the acrylic tank surrounded by photo-multiplier tubes (PMT). The coverage is 77%. This means that the photo-multipliers are closely packed together. This is an important ingredient in order to reach high light. The number of photons that can be collected depends on the resolution that can be achieved.

The entire detector is diploid in water pool. In this case there is 20 kt of water around which is on one end shielding neutros and  $\gamma$  from the rock. On the other hand can be kept by photo-multiplier tubes and can act as a Veto to tag the muons.

The experiment has been started in 2013 with the approval of China and later of several other countries mostly from Europe with additional funding:

- Italy
- Germany
- France

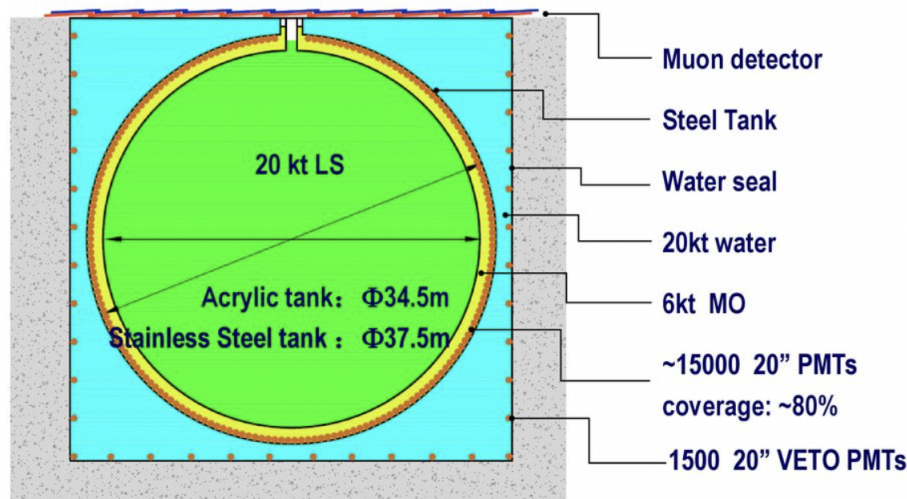


Рис. 3.2. LS detector

- Russia
- Belgium
- Czechia

The location of JUNO is in the South of China. This place is chosen because it is equal distance from two sides: Yangjlang and Talshan where the sets of nuclear power core are being installed.

There are in total 71 members equally split between Asia and Europe. There are also some members from America, from Brazilia and etc. In addition to these 71, there are 2 institutions which applied to enter: Department of Physics (Jyvaskyla University, Finland) and Insitute of Electronics and Computer Science (Riga, Latvia).

### Approach to infer the Mass Hierarchy

Approach to infer the Mass Hierarchy is fundamentally based on the classical reaction that occur in liquid scintillator when antineutrion interacts with proton that produces an electron and positron. Then the delayed coincidence, enuacleation of positron, occurs. The total energy is the sum of  $\gamma$  and kinetic energies. This is the prompt signal which occurs within a few seconds.

On the other hand neutron thermalizes and with the delay which depends on the characteristic of liquid scintillator is captured by protons. This produces distinctive  $\gamma$ . The time coincidence between these two signals is very characteristic. These events can be picked up even for a case when there is high correlated background.



In practice the positron spectrum can be observed in liquid scintillator by observing the light produced by positron through photo-multipliers. The spectrum in this example is shown as a ratio of distance and energy. In practice this spectrum is distorted by oscillation. The survival probability can be shown as a formula:

$$\Delta_{ij} = \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E_\nu}$$

$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$$

The approximation can show the difference between normal and inverted hierarchy:

$$\Delta m_{32}^2 \approx \Delta m_{31}^2$$

$$P_{ee} = \left| \sum_{i=1}^3 U_{ei} \exp\left(-i \frac{m_i^2}{2E_i}\right) U_{ei}^+ \right|^2 =$$

$$= \begin{cases} 1 - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2(\Delta_{21}) \\ - \cos^2 \theta_{12} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2(\Delta_{31}) \\ - \sin^2 \theta_{12} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2(\Delta_{32}) \end{cases}$$

$$P_{ee} = \begin{cases} 1 - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2(\Delta_{21}) \\ - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2(|\Delta_{31}|) \\ - \sin^2 \theta_{12} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2(\Delta_{21}) \cos(2|\Delta_{31}|) \\ \pm \frac{\sin^2 \theta_{12}}{2} \sin^2 2\theta_{13} \sin(2\Delta_{21}) \sin(2|\Delta_{31}|) \end{cases}$$

The big suppression is the solar oscillation. The ripple is the atmospheric oscillation.  $|\Delta m_{31}^2|$  from frequency MH encoded in the phase high value of  $\theta_{13}$  is crucial. The phase of the ripple can tell if hierarchy is normal or inverted.

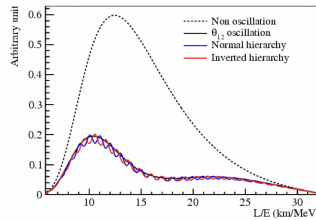


Рис. 3.3. MH and survival probability

## Neutrino and positron spectra

There is no energy resolution when there is spectrum in term of neutrino energy. However, there is energy resolution when the spectrum is described in term of positron visible energy. In practice the positron energy is measured with the resolution typical for mass spectra. If there is assumption of 3% there is washing out effect of resolution. The energy resolution is fundamental to preserve the information on the mass hierarchy.

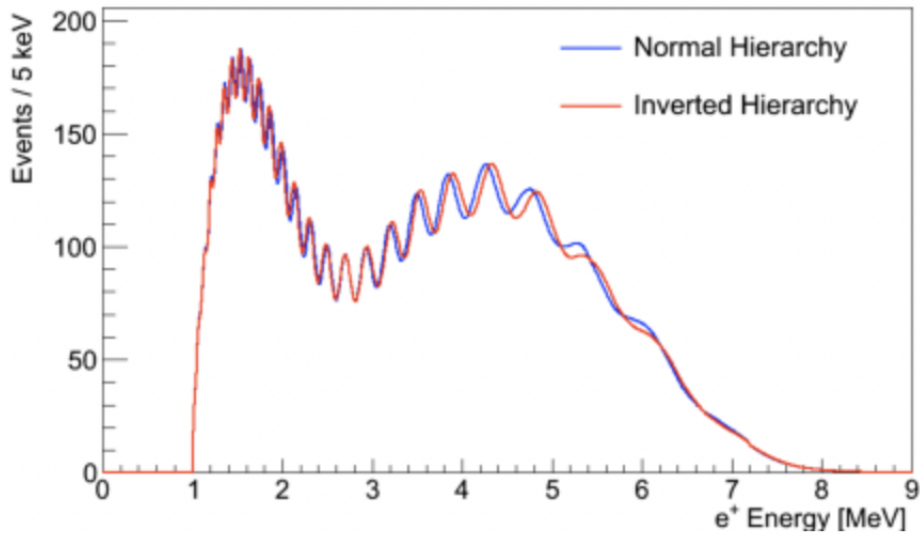


Рис. 3.4. Neutrino spectrum

In practice in order to extract the information it is necessary to perform  $\chi^2$  analysis. This test can be used to compare true hierarchy with both reference hierarchy (normal and inverted), and then look for minimum by moving  $|\Delta m_{31}^2|$ .

$$\Delta\chi^2 = \chi_{min}^2(NH) - \chi_{min}^2(IH)$$

The best fit for NH minimum value is  $1.6 \cdot 10^{-2}$  (practically 0), and fit for Ih minimum value is 4.0. The difference of true and false data is:

$$\overline{\Delta\chi^2} \sim 4.0$$

The best fit  $|\Delta m_{31}^2|$  is different in the two cases. Fit almost succeeds in accommodating IH spectrum to NH data. The two solutions are fully degenerate but in a limited range of distances.

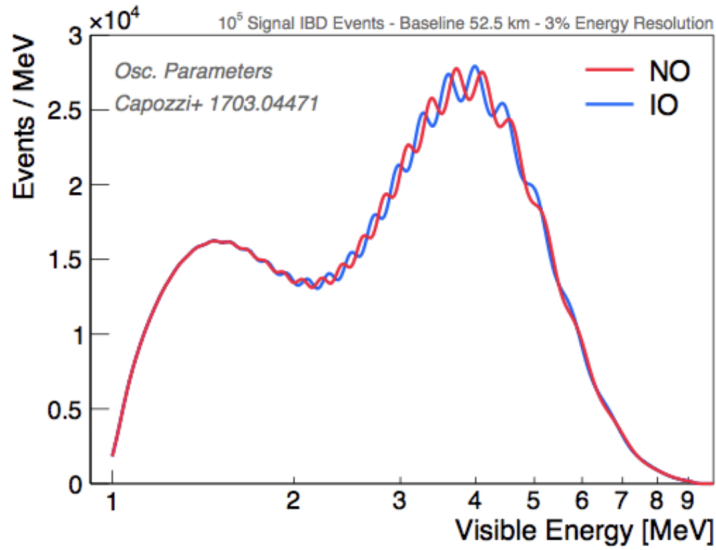


Рис. 3.5. Positron spectrum

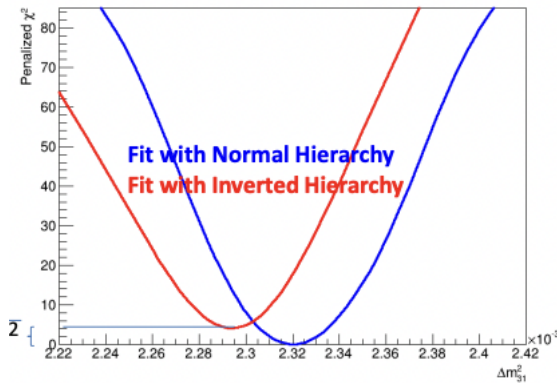


Рис. 3.6. Best fit

The special relation between  $\sigma$  and mean value of the two distributions implies that the median sensitivity according to the frequentist framework is automatically equal to:

$$\sqrt{\Delta\chi^2}\sigma$$

This means that if the actual outcome of the experiment is more extreme than the expected mean value one get a positive indication for one of the two hierarchies (IH if the outcome is positive or NH if the outcome is negative) with a CL better than  $\sqrt{\Delta\chi^2}\sigma$  i.e. with a probability of making a mistake equal to corresponding one tailed p-value on the Gaussian curve. In summary for JUNO:

- If the outcome is as typically expected, then the MH will be determined rather

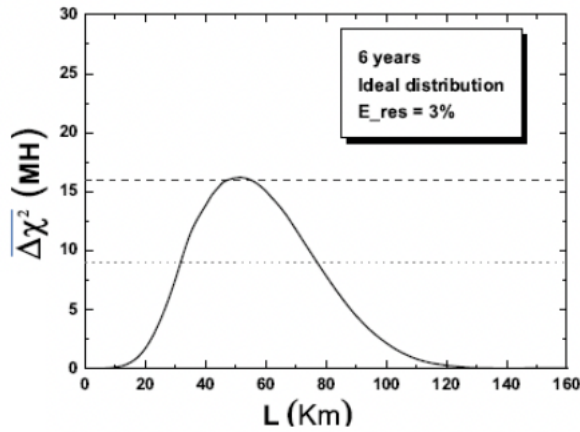


Рис. 3.7. Optimum distance to maximize  $\overline{\Delta\chi^2}$

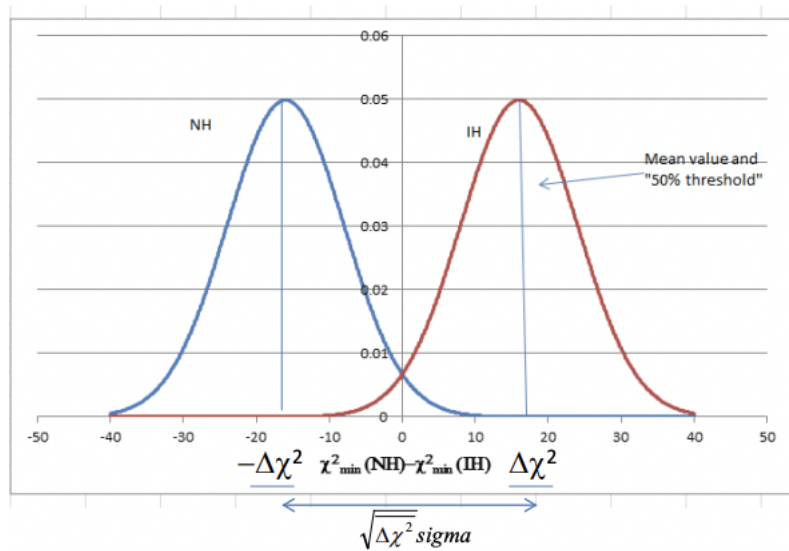


Рис. 3.8. Gaussian curves

unambiguously

- Even better if there will be an upward fluctuation
- A downward fluctuation will produce an ambiguous result

With next characteristics JUNO declare a  $4\sigma$  sensitivity with above meaning:

- Baseline: 52 km
- Fiducial Volume: 20 kt
- Thermal Power: 36 GW

- Exposure Time: 6 years
- Proton content: 12 % in mass, energy resolution 3 %

The important characteristic that have to be taken into account while constructing the detector is the fact that the distance to the cores must be very precise. Otherwise, there can be destructive interference due to having several reactors on one site. Calculations show that 50 km which is the spread with which the reactors will be located with respect to JUNO site is already an important effect to depress slightly the sensitivity of JUNO.

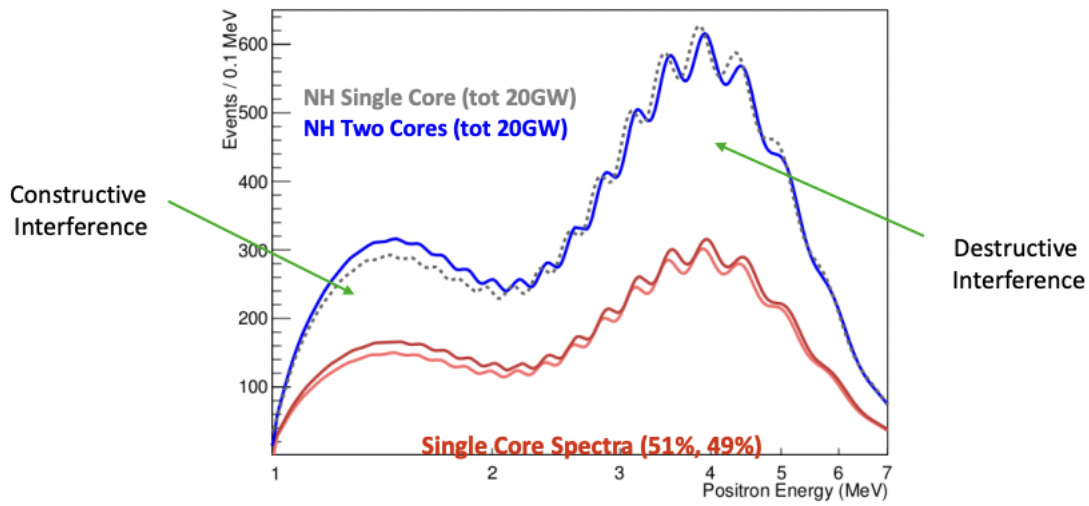


Рис. 3.9. Constructive and destructive interference

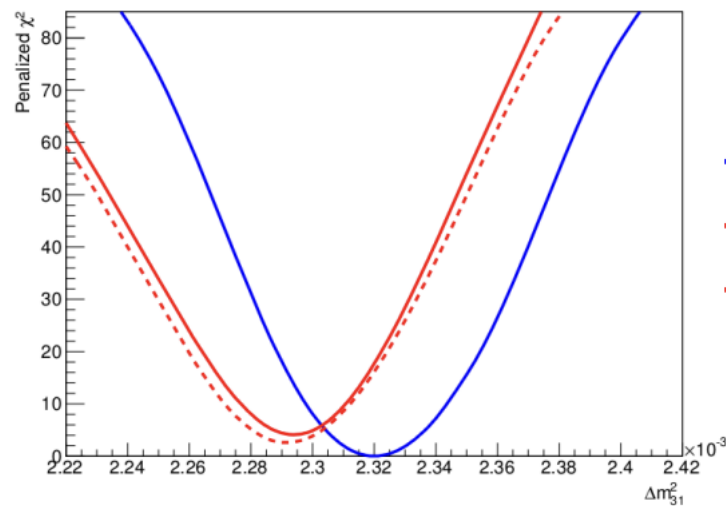


Рис. 3.10. Multiple cores

Sensitivity loss is measured through the new  $\chi^2$  minimum. If  $\overline{\Delta\chi^2}$  between IH and NH is reduced from 4.0 to 2.6 in the JUNO set-up the spread of the cores is 500 m. The  $\overline{\Delta\chi^2}$  reduction is about 5.

There are adverse effects:

- Non linearity of the energy scale. This clearly impacts the ability to distinguish the true from false hierarchy since distorts the experimental spectrum, therefore a very careful calibration is required better than 1%, as well as the long term stability of the detector.
- Reactor shape uncertainty (1%)
- The statistical and shape uncertainties of backgrounds

The favorable element for analysis is improved knowledge of  $\Delta m_{31}$  to 1% by other experiments specifically T2K and NovA. Exploited by adding a pull in the  $\chi^2$  definition thus increasing  $\chi^2$ . This is better done using the effective parameter  $|\Delta m|$ .

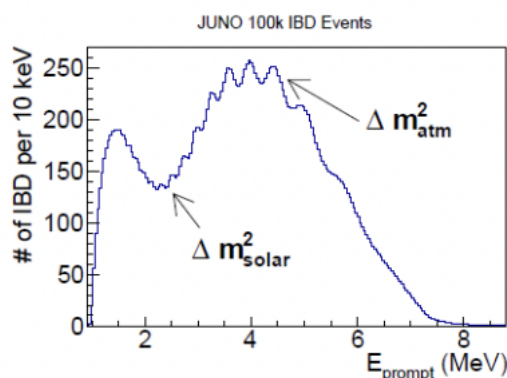


Рис. 3.11. Precision measurements

## Supernova neutrinos

One of the vast physics reach beyond reactor neutrinos is Supernova neutrino. The typical case: huge amount of energy ( $4 \times 10^{53}$ erg) emitted in neutrinos at 10Kpc. Three phases of this experiment are equally important.

Another topic that gained visibility is Geo-neutrinos. Geo-neutrinos are produced by uranium and thorium. Geo-neutrinos can be used to get more precise measurements for multiple geological insights such as, fraction of heat flow from radioactive sources nature of mantle convection energy needed to drive the plate tectonics. The same can be said about Diffuse Supernova Neutrino.

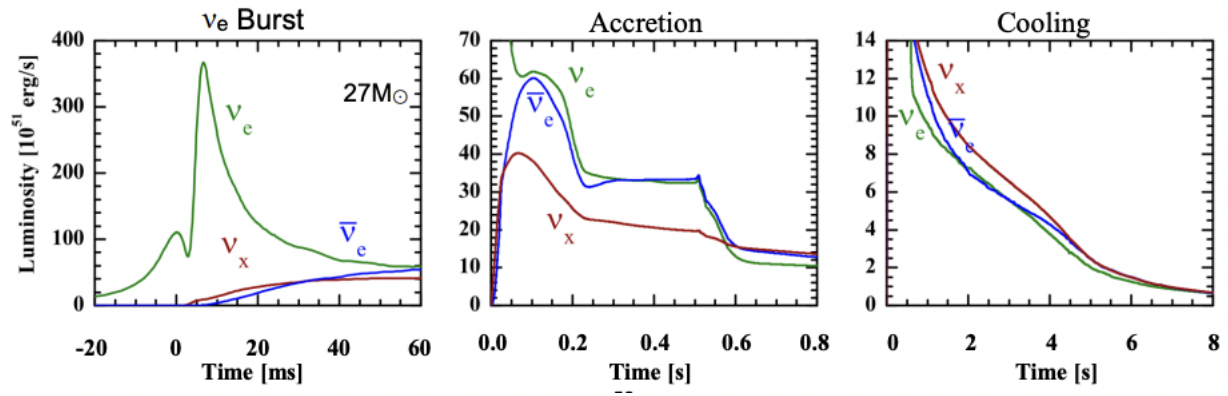


Рис. 3.12. Supernova Neutrinos

Process	Type	Events $\langle E_\nu \rangle = 14 \text{ MeV}$
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	CC	$5.0 \times 10^3$
$\nu + p \rightarrow \nu + p$	NC	$1.2 \times 10^3$
$\nu + e \rightarrow \nu + e$	ES	$3.6 \times 10^2$
$\nu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu + {}^{12}\text{C}^*$	NC	$3.2 \times 10^2$
$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow e^- + {}^{12}\text{N}$	CC	$0.9 \times 10^2$
$\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow e^+ + {}^{12}\text{B}$	CC	$1.1 \times 10^2$

Рис. 3.13. Expected events in JUNO for a typical SN distance of 10Kpc

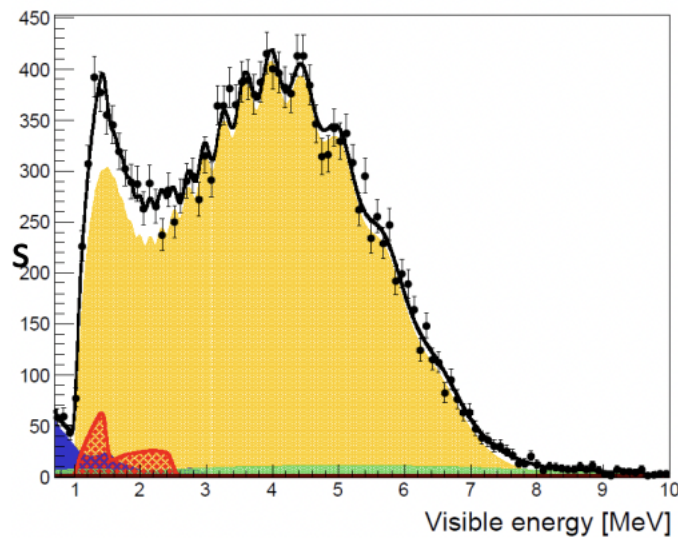


Рис. 3.14. Geo-neutrinos

## Solar Neutrinos

The fusion reactions in solar core are powerful sources of electron neutrinos. In JUNO experiment the neutrinos are from  ${}^7\text{Be}$  and  ${}^8\text{B}$  chains. It investigates transition between

	Best fit	1 y	3 y	5 y	10 y
U+Th Fix ratio	0.96	17%	10%	8%	6%
U (free)	1.03	32%	19%	15%	11%
Th (free)	0.80	66%	37%	30%	21%

Рис. 3.15. Combined shape fit of geo- $\nu$  and reactor- $\nu$

vacuum and matter dominated regimes.

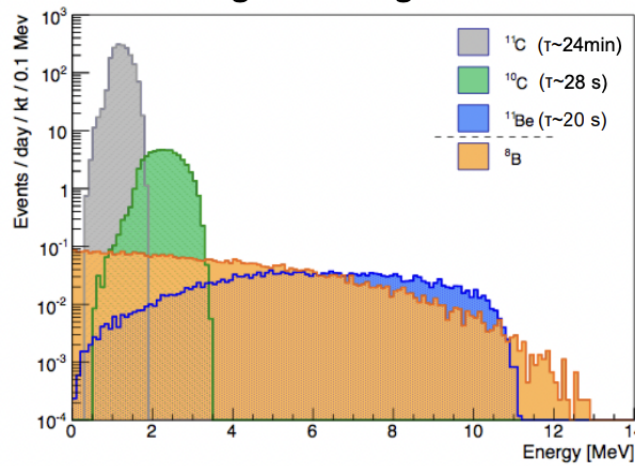
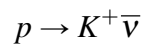


Рис. 3.16. Cosmogenic background for  $^8B$

## Proton decay

Proton decay into  $K^+\bar{\nu}$  can be shown as:



- kaon visible in liquid scintillator
- fast coincidence signature
- signal efficiency
- remaining background:  $< 0.1 \text{ ev/yr}$

After several design iterations it has been decided that in the water pool surrounding the detector the acrylic vessel surrounded by steel truss will be stored. The steel truss



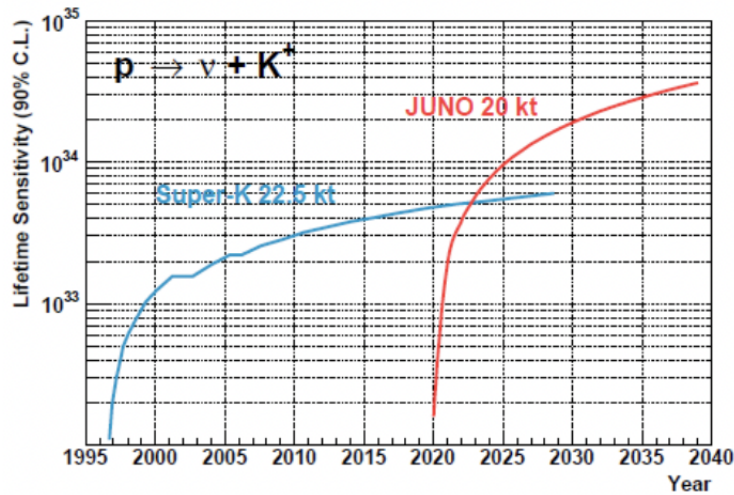


Рис. 3.17. Proton decay into  $K^+\bar{\nu}$

substains the photo-multiplier between 18000. There will be compensating coil around the water pool in order to compensate the magnetic field. The photo-multipliers are very sensitive to magentic field. All the problems of shrinkage and shape variation were resolved. Three companies had good practices.

Muon veto is critical to reduce backgrounds. Muons can be tagged and tracked by top tracker using OPERA plastic scintillator. Three layers are used to ensure good muon tracking. There is partial coverage due to available modules. Only 50% of the muons are tracked. The sample of tagged muon is provided to study reconstruction and background contamination with central detector.

The arrangement of the photo-multipliers is studied in order to maximize detection efficiency of Cherenkov light.

The central detector distinctive feature is resolution. This will be obtained with high coverage 78% and it will be the central detector with the highest precision calorimetry ever built.

Detector resolution can be calculated as:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + b^2 + \left(\frac{c}{E}\right)^2}$$

### JUNO electronics layout

The PMT front-end electronics will be installed very close to the PMT, underwater. The high voltage power supply will be placed very close to the PMT, underwater. Back-end electronics will be located outside. Two different ADCs are being developed and will

be tested with the electronics prototypes.

The vast potential physics reach of very large liquid scintillator detectors – MH determination and beyond – is the foundational motivation of JUNO conceived and planned to mark significant breakthrough for the ultimate quest of the neutrino properties.

The collaboration is rapidly progressing toward the construction of the detector with all the important design decisions already taken and with the excavation progressing rapidly.



ФИЗИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ  
МГУ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА

*teach-in*  
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ