

Экзаменационные вопросы по курсу «Элементы нейтринной физики и астрофизики»



ОИЯИ, Дубна
декабрь 2025

Обозначения:

- **Вопросы по собственному выбору.** Одного достаточно, но можно выбрать и два. Предполагается подробный письменный ответ «с формулами», при необходимости, – с графиками и с чем угодно ещё (скажем, с компьютерными анимациями). Это безусловно не означает, что при ответах на остальные вопросы формулы, рисунки, таблицы и т.п. использовать нельзя (см. ниже).
 - **Обязательные вопросы.** Они будут задаваться случайным образом (методом тыка).
 - **Факультативные вопросы.** Знание ответов приветствуется, но не требуется (т.е. влияние этих вопросов на общую оценку **неотрицательно**).
 - Нетрудно догадаться...
- Вопрос или раздел исключён (8 часов лекций в этом году пропало по ряду причин).

Примечания:

- Используйте для подготовки последнюю версию «[Lecture notes](#)». ^a
- Обратите внимание на Приложения. Они обычно не обязательны, но могут быть полезны, а в некоторых случаях необходимы (это всегда ясно из контекста) при изучении основного материала.
- Не забудьте, что раздел «[Cosmic Rays — short review supplement to sections “Atmospheric Neutrinos” and “Astrophysical Neutrinos”](#)» (файл «CR.pptx» или «CR.pdf» – для тех, у кого нет MS PowerPoint или его аналога, например, WPS Office) является **обязательной** частью курса. ^b
- При ответах на экзамене допускается использование файлов «[Lecture notes](#)», «[CR.pptx](#)» и любых других материалов, выложенных на странице http://theor.jinr.ru/~vnaumov/Eng/JINR_Lectures/NPA.html.
- Использование иллюстраций из конспекта полезно (иногда неизбежно) при ответах на некоторые вопросы, в частности, когда в вопросе фигурирует прямая ссылка на рисунок. Использование для тех же целей учебников, монографий и даже (профессиональных) веб-страниц тоже допускается, а обзоров и оригинальных научных статей или епринтов приветствуется.
- Некоторые вопросы частично пересекаются, но так и задумано.
- Классификация вопросов по разделам часто не совпадает с оглавлением лекций ^c, но отыскать «где про это написано» будет, надеюсь, нетрудно.

^ahttp://theor.jinr.ru/~vnaumov/Eng/JINR_Lectures/Lectures_files/NPA_compressed.pdf. Ссылки на страницы, номера разделов и формул относятся к этой версии.

^bПоследняя версия здесь: http://theor.jinr.ru/~vnaumov/Eng/JINR_Lectures/Lectures_files/CR/CR.pptx; версия без анимаций здесь: http://theor.jinr.ru/~vnaumov/Eng/JINR_Lectures/Lectures_files/CR/CR.pdf

^cТак, например, вопросы по космическим лучам очевидно связаны как с атмосферными, так и с астрофизическими нейтрино. Поскольку Вы прослушали весь курс, в разделе, условно названном «**История**», спрашивается не только (и не столько) о датах и именах... Хотя имена «отцов-основателей» знать тоже надо.

1. История

- В чём заключалась проблема непрерывного β -спектра, обнаруженного в экспериментах Чедвика [Chadwick, 1914]? Какая модель ядра была общепринятой в те годы? Какие объяснения результата Чедвика предлагались до гипотезы Паули? В чём заключалась проблема «неправильного спина» [“wrong” spin of ^{14}N], называемая так же «азотной катастрофой»? Какой результат был получен в экспериментах Гайтлера–Герцберга [Heitler-Herzberg, 1929] и Разетти [Rasetti, 1929]?
- В чём заключалась гипотеза Паули [Pauli, 1930], объясняющая наблюдаемые загадки β -спектров?
- Что Вы знаете об открытии нейтрона [Chadwick, 1914] и о моделях ядра, предложенных Иваненко, Гайзенбергом и Майораной [Iwanenko, Heisenberg, Majorana, 1932]?
- Чем принципиально отличаются гипотеза Паули и теория β -распада Ферми [Fermi, 1933]?
- Прокомментируйте результат Бёте и Пайрлса [Bethe & Peierls, 1934] по оценке сечения обратного β -распада.
- В чём заключалось (и чем было мотивировано) обобщение 4-фермионной теории, предложенное Гамовым и Теллером [Gamow & Teller, 1936]?
- В чём заключалась гипотеза Майораны [Majorana, 1937] о нейтральном фермионе?
- Что Вы знаете об открытии «мезотрона» [Anderson & Neddermeyer, Street & Stevenson, 1937]? Почему «мезотрон» не годится для роли юкавской частицы?
- А что такое **юкон** [yukon], **баритрон** [barytron], **тяжёлый электрон** [heavy electron]?
- Что означает термин **мюография** («мюонная радиография», «мюонная томография»)?
- В чём заключалась т.н. « $\pi - \mu$ схема» Сакаты–Иноуэ [Sakata & Inoue, 1946]?
- В чём заключалось (и чем было мотивировано) обобщение теории Гамова–Теллера, предложенное Ли и Янгом [Lee & Yang, 1956]?
- Что Вы знаете об открытии несохранения чётности в слабых взаимодействиях [Wu, 1957]?
- Что Вы знаете об эксперименте Райнеса и Коуэна [Reines & Cowan, Jr., 1956]?
- Что Вы знаете об осцилляционной гипотезе Понтекорво [Pontecorvo, 1957]?

- В каком эксперименте была впервые измерена спиральность нейтрино?
- Кто предложил концепцию смешивания флейворов нейтрино? В чём она заключается (на современном языке)?
- Что Вы знаете об открытии мюонного нейтрино?
- Кто впервые предложил эксперимент по измерению потока нейтрино от Солнца? На каком принципе был основан предлагаемый эксперимент?
- Что Вы знаете о пионерских экспериментах по детектированию природных (не солнечных) нейтрино?
- Что Вы знаете об открытии τ -лептонного нейтрино?
- Что Вы знаете о подземных черенковских нейтринных детекторах (IMB, Kamiokande)? На каких физических принципах основана методика детектирования нейтрино в этих установках?
- Чем и почему отличаются сигнатуры «**электроноподобных**» и «**мюоноподобных**» событий в черенковских нейтринных детекторах типа IMB и Kamiokande? К какому классу относятся события, вызванные нейтральным пионом, заряженным пионом, протоном?
- Что такое «**атмосферная (нейтринная) аномалия**», «**мюонный дефицит**»?
- Что Вы знаете о регистрации нейтринного сигнала от вспышки сверхновой SN1987A? В чём её значение для нейтринной астрономии? В чём заключались «**аномалии**», обнаруженные в сигнале от SN1987A на подземных нейтринных детекторах IMB, Kamiokande, BUST (Баксан), LSD (под Монбланом)?
- В каких экспериментах и каким образом (на основе каких физических принципов) было впервые установлено, что имеется в точности 3 поколения (флейвора) лёгких активных нейтрино? Что означает термин «лёгкие нейтрино» в контексте данных экспериментов?
- Что Вы знаете о радиохимических (хлор-аргонном и галлий-германиевом) методах регистрации солнечных нейтрино?
- Что Вы знаете о подземных черенковских детекторах солнечных нейтрино? Чем отличается методика регистрации солнечных и атмосферных нейтрино в этих детекторах?
- Что Вы знаете об эксперименте Super-Kamiokande?
- Что Вы знаете о физических принципах регистрации и идентификации событий в детекторе SNO?
- Что Вы знаете о реакторных антинейтринных экспериментах?

- Какие реакции используются в реакторных экспериментах для регистрации нейтринных событий?
 - В чём заключается важность измерения угла смешивания θ_{13} ?
 - Что Вы знаете об эксперименте KamLAND?
 - Чем, по Вашему мнению, важны эксперименты SNO и KamLAND для нейтринной физики?
 - Что Вы знаете об эксперименте OPERA? В чём состояла основная задача этого эксперимента? Расскажите о методе регистрации событий и обработке данных в эксперименте OPERA.
- Поясните как измерение потока «бериллиевых» нейтрино в эксперименте Borexino (2011) подтвердило решение проблемы солнечных нейтрино с большим углом смешивания [“[MSW–LMA solution](#)”].
 - В чём заключалась т.н. «[оперная аномалия](#)» [“[OPERA anomaly](#)”]? Какие эксперименты, помимо эксперимента OPERA, принимали участие в решении проблемы?
 - Что Вы знаете об экспериментах Double Chooze, Daya Bay, RENO? В чём заключается метод регистрации антинейтрино, используемый в этих экспериментах?
 - Что Вы знаете об эксперименте T2K?
 - Что Вы знаете о глубоководных и подлёдных черенковских нейтринных телескопах (Baikal NT/GVD, AMANDA, IceCube, ANTARES, NESTOR, KM3NeT,...)?
 - Чем знамениты Эрни [[Ernie](#)] и Берт [[Bert](#)]?
 - Что Вы знаете о «[нейтринной томографии](#)»,?

2. Взаимодействия нейтрино с веществом

- Выведите основные формулы кинематики квазиупругого рассеяния нейтрино на нуклоне.
- Выведите основные формулы кинематики нейтринорождения пиона на нуклоне.
- Выведите основные формулы кинематики глубоко неупругого рассеяния нейтрино на нуклоне.
- Какие эксклюзивные реакции дают основные вклады в полное сечение $\nu_\mu N$ -взаимодействия при относительно низких энергиях ($E_\nu \lesssim 10$ ГэВ)?
- Какое сечение больше – $\sigma(\nu_e + n \rightarrow p + e^-)$ или $\sigma(\nu_\tau + n \rightarrow p + \tau^-)$? Почему?
- Какое сечение больше – $\sigma(\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-)$ или $\sigma(\bar{\nu}_e + p \rightarrow \bar{\nu}_e + p)$? Почему?
- Оцените порог рождения пиона при взаимодействии нейтрино с протоном.

- Что такое гиперзаряд, слабый гиперзаряд, G -четность, токи первого и второго рода?
- Сформулируйте теорему Вайнберга [Weinberg, 1958] для слабых токов первого и второго рода.
- Выведите (и/или проверьте на примерах) формулу Гелл-Манна–Нисидзимы (а может Нишиджимы) [Gell-Mann, 1956, Nishijima, 1955].
- Что Вы знаете о структурных функциях и формфакторах нуклона?
- Докажите, что адронный тензор определяется шестью структурными функциями.
- Что такое «резонанс Глэшоу»? Оцените величину резонансной энергии.
- Какими формфакторами определяется слабый заряженный адронный ток? Какие из них отсутствуют в Стандартной Модели и почему?
- Докажите, что слабый заряженный адронный ток определяется шестью формфакторами.
- Выразите структурные функции нуклона для CCQE реакций через формфакторы квазиупругого νN -рассеяния.
- Поляризационная матрица плотности и вектор поляризации лептона в νN взаимодействиях.
- Как (примерно) зависит от энергии E_ν полное сечение $\nu_\mu N$ -взаимодействия при высоких энергиях ($E_\nu \gtrsim 100$ ГэВ)?
- Проблемы взаимодействия нейтрино с ядрами. Объясните на качественном уровне в чём заключается $2p2h$ механизм и чем он отличается от $1p1h$ механизма? Что такое «взаимодействие в конечном состоянии» [“FSI”]? Что такое «обменный заряженный ток» [“MEC”]? «внутриядерный каскад» [“INC”]?

3. Солнце и солнечные («термоядерные») нейтрино

- Какая реакция ответственна за максимальный вклад в поток солнечных нейтрино? Какими методами можно измерить поток нейтрино от этой реакции?
- Чему равен поток нейтрино в центре Солнца?
- Испускает ли Солнце антинейтрино?
- Что быстрее покидает солнечное ядро – фотоны или нейтрино?
- Какова (приблизительно) максимальная энергия солнечных нейтрино и какой процесс ответствен за рождение нейтрино таких энергий? Какими методами можно измерить поток нейтрино от этой реакции?

- Перечислите основные процессы, участвующие в pp -цепочке.
- Что такое CNO (би)цикл? Каков (приблизительно) его вклад в энергетику Солнца?
- Доказано ли существование CNO цикла экспериментально?
- Что Вы знаете о звёздном нуклеосинтезе?
- Какие астрофизические явления (по современным представлениям) ответственны за синтез тяжёлых и сверхтяжёлых (тяжелее золота) элементов?
- Какая реакция определяет масштаб времени жизни Солнца (времени существования Солнца на главной последовательности)?
- Что Вы можете сказать об эволюции Солнца в отдалённом будущем (в отсутствие существенных внешних влияний, вроде предполагаемого столкновения нашей Галактики с галактикой M31)?
- Что такое **тройной альфа-процесс** (**triple-alpha reaction**)?
- Что больше – поток солнечных нейтрино, или поток нейтрино от типичного промышленного ядерного реактора на расстоянии ~ 100 м от него?
- Зависит ли поток солнечных нейтрино у Земли от времени года?
- Какие методы детектирования солнечных нейтрино Вы знаете?
- Каковы возможные (гипотетические) источники нейтрино высоких энергий (выше ~ 100 ГэВ) в Солнце?
- Что такое «**гелиосферные нейтрино**» и каков механизм их образования?

4. Космические лучи, атмосферные и астрофизические нейтрино

- Что такое ядерно-каскадный процесс в атмосфере?
- Перечислите основные реакции, в которых рождаются атмосферные нейтрино и антинейтрино (далее АН) с энергиями ниже ~ 1 ТэВ. Как (приблизительно) меняется с энергией их относительный вклад в поток АН?
- В чём заключаются геомагнитные эффекты космических лучей (КЛ)? Как они сказываются на потоках АН? [Объясните результаты, показанные на соответствующих графиках].
- Зависит ли (и если да, то почему) поток АН у поверхности Земли от

географических координат точки наблюдения?
зенитного и азимутального углов?
солнечной активности?
времени года?
погоды?
времени суток?

- Где поток АН, приходящих в детектор у поверхности Земли сверху больше – у экватора или на средних широтах?
- Тот же вопрос для усредненного потока АН, приходящих в нейтринный детектор снизу.
- Где поток АН больше – у поверхности Земли или на высоте ~ 10 км над уровнем моря?
- В чём заключаются метеорологические эффекты КЛ? Существенны ли они для потоков АН?
- Что такое «быстрые [prompt] нейтрино»? Объясните качественно различия спектров и зенитно-угловых распределений «обычных» (π, K) и «быстрых» нейтрино.
- В каких процессах могут генерироваться атмосферные и астрофизические τ -нейтрино?
- Объясните качественно соотношение потоков электронных, мюонных и τ -лептонных (анти)нейтрино в суммарном потоке АН.
- Приведите примеры фейнмановских диаграмм, описывающих распад протона.
- Чем интересен распад протона для космологии?
- Что такое нейтрон-антинейтронные осцилляции?
- Какое отношение имеют АН к проблеме поиска распадов протона и нейтрон-антинейтронных осцилляций?
- Каковы (по порядку величины) экспериментальные верхние пределы на время жизни протона для простейших мод его распада?
- Какие эксперименты по поиску распада протона Вам известны и какие методы используются в этих экспериментах? Какова роль АН в этих экспериментах?
- В частности, что Вам известно о методах детектирования распада $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$?
- Сделайте грубую оценку времени жизни протона относительно распада $p \rightarrow \pi^0 e^+$.
- В чём заключается тесная («генетическая») связь «классических» космических лучей (далее КЛ) и астрофизических нейтрино?

- Что Вам известно об энергетическом спектре и химсоставе КЛ?
- Какова (примерно) плотность энергии КЛ в Галактике? Является ли распределение КЛ в Галактике однородным? изотропным?
- Чем объясняется огромная (5–6 порядков!) разница содержания ядер Лития, Бериллия и Бора в потоке галактических КЛ и в веществе Солнечной системы?
- Что Вы знаете о процессах
 - «спалляции/обдирки» [“spallation”],
 - «индуцированного деления» [“induced fission”],
 - «(мульти)фрагментации» [“(multi)fragmentation”] и
 - «испарения» [“vaporization or evaporation”]
 в контексте проблемы трансформации химсостава КЛ в космосе? Почему процессы испарения редки?
- Что Вы знаете о современном статусе проблемы антивещества (позитроны, антипротоны, антиядра) в контексте физики КЛ?
- Объясните связь между магнитной активностью Солнца и потоками КЛ у Земли.
- Что Вы знаете об основных (с точки зрения физики КЛ) результатах миссий «Вояджер» [“Voyager 1,2”]?
- Что такое «высокоширотное обрезание» спектра КЛ? В чём его причина?
- В чём разница между точечными и диффузными астрофизическими источниками нейтрино?
- Какие (предполагаемые) астрофизические источники КЛ, γ и нейтрино Вам известны?
- Объясните физический смысл термина «вмороженное магнитное поле».
- Выведите условие Хилласа и объясните физический смысл диаграммы Хилласа (прокомментируйте соответствующие рисунки в конспекте).
- Каковы типичные энергии нейтрино, возникающих при взрывах сверхновых?
- Поясните (настолько подробно, насколько возможно) данные об основных источниках нейтрино, представленные в табличке и на рисунках из раздела «Нейтрино на Земле и в небесах» [“Neutrinos on Earth and in the Heavens”].
- При каких энергиях (приблизительно) Земля становится непрозрачной для нейтрино? [Сделать грубую оценку.]

- За счёт каких механизмов происходит поглощение гамма-излучения в космосе?
- Изобразите фейнмановские диаграммы для рассеяния Комптона [Compton], Баба [Bhabha] и Мольера [Møller] и поясните роль этих процессов в формировании радиоизлучения ШАЛ.
- Каков современный экспериментальный статус проблемы астрофизических нейтрино?
- Что Вам известно о событии IceCube-170922A? В чём важность этого события для нейтринной астрономии?
- Что такое активное галактическое ядро? радиогалактика? блазар? Что Вы знаете о современных моделях этих объектов?
- Что такое экваториальные и галактические координаты?
- Что Вы знаете о современном экспериментальном статусе гравитационно-волновой астрономии?
- Что такое стохастические гравитационные волны?
- В чём по Вашему мнению заключаются преимущества и недостатки нейтринной астрономии высоких энергий по сравнению с гамма-астрономией и гравитационно-волновой астрономией?
- Что Вы знаете о космических гамма-вспышках (GRB)?
- Перечислите основные цепочки процессов, приводящих к образованию нейтрино высоких энергий в струях (джетах) АГЯ.
- Что Вы знаете о ГЗК обрезании спектра первичных КЛ? Выведите формулу для порога фоторождения пионов, т.е. рождения пионов при взаимодействии протонов КЛ с реликтовыми фотонами.
- Что Вы знаете о космогенных (ГЗК) нейтрино? Выпишите основные реакции (фоторождение пионов, e^+e^- пар и т.д.), влияющие на энергетический спектр и флейворный состав космогенных нейтрино. Каков современный экспериментальный статус проблемы детектирования ГЗК нейтрино?
- Теория образования космогенных нейтрино. Рассмотреть процессы фоторождения одиночных и множественных пионов и e^+e^- -пар, фотодезинтеграцию/фотоэрозия ядер (выписать и пояснить цепочку уравнений переноса), перечислить основные реакции рождения нейтрино, электронов и позитронов в межгалактической среде.
- Поясните связь ГЗК нейтрино и γ -излучения.
- Что Вы можете рассказать о двух возможных механизмах (сценариях) генерации КЛ сверхвысоких энергий: «сверху вниз» [“top-down”] и «снизу вверх» [“bottom-up”]? Приведите

несколько характерных примеров. Какие из сценариев применимы к генерации γ -квантов и нейтрино сверхвысоких энергий?

- В чём заключаются pp - и $p\gamma$ -механизмы генерации астрофизических нейтрино высоких энергий? Что такое « Z -вспышка» [Z -burst]?
- Что Вы знаете о методах детектирования КЛ, γ -квантов и нейтрино сверхвысоких энергий (выше $\sim 100 \text{ EeV}$)?
- Объясните механизм ускорения Ферми второго порядка.
- В чём заключается стохастический механизм ускорения Ферми? Почему этот механизм не эффективен для ускорения частиц до ультрарелятивистских энергий?
- Выведите формулу прироста энергии релятивистской частицы при столкновении с массивным объектом (« ракеткой »).^a Выведите условия отражения заряженной частицы от « магнитное зеркало ». Выведите условия генерации степенного спектра КЛ. Годится ли он для описания наблюдаемого спектра?
- Объясните механизм ускорения Ферми первого порядка. Выведите формулу прироста энергии релятивистской частицы при пересечении фронта ударной волны. Выведите условия генерации степенного спектра КЛ. Годится ли он для описания наблюдаемого спектра?
- Выведите условия генерации степенного спектра КЛ при стохастическом ускорении Ферми первого порядка.
- Поясните физический смысл классификации типов событий в детекторе IceCube. Чем интересны события с рождением τ -лептона?

5. Геонейтрино

- Что Вы знаете о строении Земли? В чём заключается т.н. « $\text{Предварительная эталонная модель Земли}$ » (PREM)?
- Что Вы знаете о механизмах генерации тепла в Земле? При чём тут метеориты?
- Каковы типичные энергии геофизических антинейтрино (ГА)?

^aФормулы на стр. 254 (ускорение релятивистских частиц) можно не выводить, но нужно пояснить их физический смысл и объяснить (прокомментировать) рис. на стр. 255.

- Какие процессы ответственны за образование основного потока ГА?
- Какова пороговая энергия детектирования ГА в реакции обратного бета-распада? [Вывести формулу и найти число.] Поясните детали детектирования антинейтрино.
- Перечислите основные фоновые процессы в экспериментах по детектированию ГА.
- Прокомментируйте результаты детектирования ГА в экспериментах KamLAND и Borexino.
- Каковы возможные (гипотетические) источники нейтрино высоких и сверхвысоких энергий (выше ~ 100 ГэВ) в центре Земли?
- В чём заключается гипотеза геореактора? При чём тут Габон?

6. CMB и $C_{\nu B}$

- Какова (примерно) температура, микроволнового электромагнитного излучения (CMB)?
- Какова числовая плотность и средняя энергия реликтовых фотонов?
- Каков порядок величины анизотропии CMB и в чём важность наблюдаемой неизотропности CMB?
- В чём заключается причина анизотропии CMB?
- Проанализируйте разложение температурных флуктуаций CMB по сферическим гармоникам и объясните физический смысл углового спектра мощности CMB.
- Объясните причину появления нетривиального дипольного вклада в спектр мощности CMB.
- Что Вы знаете об Аттракторе Шепли (Shapley Attractor) и Дипольном Репеллере (Dipole Repeller)?
- Выведите формулу для красного смещения CMB.
- В чём заключается проблема с постоянной Хаббла, возникшая после обработки данных эксперимента *Planck* (*Planck-2018*)?
- Что Вам известно об инфляционных моделях ранней эволюции Вселенной? Об альтернативных моделях?
- Перечислите основные этапы (эпохи) эволюции ранней Вселенной (желательно с числами).
- Что Вы знаете о первичном нуклеосинтезе? [Поясните цепочки реакций, приведённые в соответствующем разделе.]

- Что Вы знаете о тёмной материи? О тёмной энергии? Прокомментируйте самый первый рисунок из раздела «Кривые вращения галактик» [[“Galactic rotation curves”](#)].
- Прокомментируйте несколько известных Вам гипотез о возможной природе тёмной материи, показанные на т.н. «ментальных картах» [[“Mind maps”](#)].
- Сделайте оценку средней температуры и средней энергии реликтовых нейтрино ($C\nu B$), их числовой плотности, локального потока.
- Выведите выражение для интеграла столкновений в общерелятивистском уравнении Больцмана без учета смешивания нейтрино.
- Что Вам известно о современных ускорительных и космологических ограничениях на число типов нейтрино и суммарную массу нейтрино всех типов ($\sum_i m_i$)?
- Каковы современные экспериментальные оценки долей обычной материи, радиации, тёмной материи, тёмной энергии и нейтрино во Вселенной?
- В каких экспериментах (и на каких основаниях) были получены указания на наличие ускорения хаббловского расширения?
- В чём заключается загадка «космического совпадения» [[“cosmic coincidence problem”](#)]?
- Где плотность $C\nu B$ больше – в галактиках или в межгалактическом пространстве? Почему?
- Выведите формулу для красного смещения безмассовый реликтовых нейтрино.
- Что такое «поверхность последнего рассеяния» (ППР) реликтовых нейтрино? Можете ли вы привести качественные и количественные зависимости радиуса ППР от массы нейтрино?
- Что Вы знаете об ограничениях на число типов нейтрино, следующих из данных о первичном нуклеосинтезе?
- Что Вы знаете о влиянии массивных нейтрино на формирование крупномасштабных структур Вселенной?
- Кинетика нейтрино в ранней Вселенной: общерелятивистское уравнение Больцмана, основные реакции.
- Как можно обобщить уравнение Больцмана с учётом смешивания и эффекта преломления нейтрино?

7. Массы и смешивание нейтрино в Стандартной Модели

- В чём разница между дираковскими и майорановскими нейтрино?
- Что такое вакуумная матрица смешивания нейтрино (ПМНС матрица)?
- Получите связь полей дираковских нейтрино с определенной массой и определенным флейвором.
- Получите связь полей майорановских нейтрино с определенной массой и определенным флейвором.
- В чём причина сохранения лептонных чисел в Стандартной Модели с безмассовыми нейтрино?
- Подсчитайте число физических фаз в матрицах смешивания дираковских и майорановских нейтрино.
- В чём разница между естественной и обратной иерархиями масс нейтрино?
- Приведите 3–4 примера процессов, идущих с нарушением индивидуальных лептонных чисел L_e , L_μ и L_τ , а так же с нарушением полного лептонного числа $L = L_e + L_\mu + L_\tau$.
- Чем определяется малость ширины радиационного (безнейтринного) распада мюона $\mu \rightarrow e\gamma$ в Стандартной Модели?
- Что Вы знаете о современном экспериментальном статусе проблемы спектра (иерархии) масс нейтрино?
- Что Вы знаете о современном экспериментальном статусе CP -нарушения в лептонном секторе Стандартной Модели? Поясните связь нарушения CP - и T -симметрий.
- Что Вам известно о современных и планируемых экспериментах по изучению иерархии (спектра) масс и CP -нарушению в лептонном секторе СМ?
- Что такое «стерильные нейтрино»? Что Вы знаете о современном экспериментальном статусе проблемы стерильных нейтрино?
- Сформулируйте теорему Мурнагана [Murnaghan theorem] для унитарных матриц.
- Поясните физический смысл киральных проекций фермионного поля.
- Докажите, что любая комплексная несингулярная матрица может быть диагонализирована с помощью биунитарного преобразования. Выведите отсюда формулу для диагонализированных массового и кинетического вкладов в лагранжиан дираковского нейтрино.
- Поясните смысл флейворного содержания массовых состояний и массового содержания флейворных состояний.

- Поясните данные, представленные на диаграмме Мураямы [Murayama plot], представленных в разделе «Диаграмма параметров смешивания нейтрино» [“Neutrino mixing parameter plot”].
- Поясните качественно физический смысл сомножителей в формуле для энергетического спектра электронов β -распада. Как учитываются переходы в возбуждённые состояния и отдача дочернего ядра?
- Что такое эффективная масса нейтрино от β -распада, m_β ? Выведите формулу для m_β как функции параметров смешивания.
- Что означает термин «график Кури» [Kurie plot = Kurie-Fermi = Fermi plot]^a?
- В чём сложность измерений «на конце β -спектра» и как решается эта проблема?
- Что Вы знаете о современных экспериментальных ограничениях на величину m_β ? В частности, прокомментируйте недавние результаты эксперимента KATRIN.
- Поясните механизм двойного безнейтринного β -распада ($0\nu\beta\beta$).
- Что такое эффективная масса нейтрино ($m_{\beta\beta}$) в $0\nu\beta\beta$ -распаде?
- Что Вы знаете о современном экспериментальном статусе проблемы $0\nu\beta\beta$? Объясните качественно диаграмму, ограничивающую допустимые области на плоскости $m_{\text{lightest}} - \langle m_{\beta\beta} \rangle$. Какова здесь роль майорановских фаз?
- Что Вы знаете о результатах эксперимента «Heidelberg-Moscow» по поиску $0\nu\beta\beta$ -распада?
- Сформулируйте теорему Шехтера-Валле (Schechter-Valle = “Black-box” theorem) и приведите пример.
- Что Вы знаете о проблеме массы нейтрино? Почему малые массы нейтрино свидетельствуют о неполноте Стандартной Модели?
- Что означает термин «качельный механизм» [“see-saw”]? Какие типы see-saw Вы знаете?
- Выведите формулы для диагонализации смешанной дираковско-майорановской массовой матрицы в модели с одним флейвором.
- Перечислите и прокомментируйте главные нерешенные на сегодня проблемы нейтринной физики.

^aВ русскоязычной литературе чаще говорят о графике Кюри или Ферми-Кюри.

8. Нейтринные осцилляции в вакууме ■ (раздел исключён)

- Что Вы знаете об экспериментах по изучению нейтринных осцилляций?
- В рамках стандартной квантовомеханической (КМ) теории выведите общую формулу для вероятности флейворных переходов нейтрино в вакууме
- Как зависит от энергии длина осцилляций нейтрино?
- Что Вы можете сказать о сохранении энергии в стандартной (КМ) теории нейтринных осцилляций?
- Зависят ли вероятности нейтринных осцилляций от природы массы нейтрино (дираковская / майорановская)?
- Проанализируйте формулу для вероятности осцилляций в 2ν модели ($\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$). Почему эта «игрушечная» модель неплохо работает на практике?
- В чём состоят преимущества осцилляционных экспериментов с АН? А есть ли недостатки? Существен ли учёт поглощения нейтрино в Земле в таких экспериментах?
- Стандартная квантовомеханическая теория нейтринных осцилляций.
- Какие положения квантовомеханической (КМ) теории нейтринных осцилляций представляются спорными? Почему эта теория не может быть справедливой на очень больших расстояниях между источником и детектором? Или может?...
- Могут ли лёгкие нейтрино «проосциллировать» (превратиться) в тяжёлые?
- Осциллируют ли реликтовые нейтрино?
- Почему не осциллируют заряженные лептоны?
- Основные идеи ковариантной квантовополевой теории нейтринных осцилляций.
- Поясните иерархию масштабов пространственно-временных областей в макроскопических фейнмановских диаграммах.
- Теория волновых пакетов в КМ и КТП.
- Сформулируйте условие квазистабильности релятивистского гауссового волнового пакета.
- Докажите, что масса волнового пакета больше полевой массы.
- Докажите, что квазистабильный волновой пакет в среднем движется по классической траектории.

9. Нейтринные осцилляции в веществе ■ (раздел исключён)

- Показатель преломления нейтрино в веществе и его связь с эффективным потенциалом [“[matter potential](#)”]. Уравнение Вольфенштейна [Wolfenstein, 1978]. Оператор эволюции.
- Докажите, что одинаковые для всех нейтрино вклады в потенциал среды не изменяет картину флейворных осцилляций.
- Используя уравнения Вольфенштейна выведите уравнение Лиувилля – фон Нейманна [“[Liouville – von Neumann equation](#)”] для матрицы плотности, описывающей эволюцию смешанных состояний нейтрино в среде.
- В чём заключается четырёхфермионное приближение Стандартной Модели? Какова область его применимости? Выпишите пример эффективного лагранжиана.
- Выведите явный вид потенциала для электронного нейтрино в нормальной (однородной, изотропной C -нечётной) среде.
- Найдите решение уравнения Вольфенштейна для 2ν системы в нормальной непоглощающей среде постоянной плотности. Проанализируйте решение.
- Что называется осциллограммой? Прокомментируйте приведённые в лекциях примеры.
- При каких условиях требуется учитывать поглощение нейтрино в среде? Как это можно сделать в рамках феноменологического подхода с комплексным показателем преломления? Выведите основное уравнение теории [“[master equation \(ME\)](#)”] из обобщённого уравнения Вольфенштейна с неэрмитовым гамильтонианом. Приведите примеры, в которых решения МЕ не совпадают с решениями стандартного (не учитывающего поглощение нейтрино) уравнения Вольфенштейна.
- В чём причина разницы в сечениях взаимодействия ν_e , ν_μ и ν_τ с нуклонами?
- Прокомментируйте (поясните «на пальцах») поведение вероятностей, показанных на стр. 689–692.
- Что называется «объектом Торна-Житков» [“[Thorne-Żytkow object \(TZO\)](#)”]?
- Приведите реалистичные примеры случаев, когда при расчёте вероятностей осцилляций нейтрино необходим (но не достаточен) учёт поглощения нейтрино в среде.

10. Разное и вперемешку (включая простые задачи)

- Что Вы знаете о потоке солнечных «тепловых» [“thermal”] нейтрино?
- Почему в Солнце не идёт реакция ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^4_2\text{He}$?
- Что понимается под термином «Большой единый нейтринный спектр» [“Grand unified neutrino spectrum (GUNS)”]? Какие участки GUNS пока не изучены?
- Что такое «многоканальная астрономия» [“multi-messenger astronomy”]?
- Почему наблюдение синхротронного излучения ряда астрофизических объектов может считаться однозначным доказательством ускорения КЛ в этих объектах? Приведите примеры. В рамках этой концепции объясните наблюдаемый спектр излучения Крабовидной Туманности.
- Какими величинами характеризуется анизотропия КЛ? Что Вам известно о недавних результатах экспериментов Pierre Auger и Telescope Array по измерению анизотропии КЛ сверхвысоких энергий и об интерпретации этих результатов?
- Что такое «Ланиакее» [“Laniakea”]? Как соотносятся размеры Ланиакее со шкалой ГЗК?
- Укажите последовательность возрастания расстояний от Солнца для структурных единиц гелиосферы – космической среды, находящейся под влиянием солнечного ветра:
 - (1) гелиопауза [“Heliopause”],
 - (2) ударный слой [“Heliosheath”],
 - (3) водородная стена [“Hydrogen wall”],
 - (4) ударная волна [“Termination shock”],
 - (5) головная ударная волна [“Bow shock”].
- Где примерно прекращается влияние солнечного ветра на галактические КЛ (название слоя, приблизительное расстояние)?
- Чем потенциально интересны для физики КЛ сверхвысоких энергий т.н. «галактики с бурным (активным) звёздообразованием» [“starburst galaxies (SBG)”]?
- Что такое «космогенный нуклеосинтез» [“Cosmogenic nucleosynthesis”]?
- Объясните качественно возможную связь между наблюдаемой периодичностью «разнообразия видов» [“Genus diversity”] и КЛ.

- Что Вы знаете о структуре гелиосферы? Какие новые факты получены Вояджерами?
- Докажите, что кривая вращения спиральной галактики должна (в отсутствие тёмного гало) спадать как $1/\sqrt{r}$ на больших расстояниях r от галактического центра.
- Почему наблюдаемое в некоторых удалённых галактиках (например, ультра-диффузных) отсутствие гало тёмной материи парадоксальным образом свидетельствует скорее в пользу наличия во Вселенной тёмной материи, а не, к примеру, нарушения законов Кеплера?
- Прокомментируйте современные наблюдательные данные о «барионном бюджете» Вселенной.
- Что такое «нейтринная рябь» [“neutrino ripples”]?
- В чём состоит проблема первичного лития?
- Что такое «нейтрино от первичного нуклеосинтеза» [“BBN neutrinos”]?
- Что такое «Pre-BBN neutrinos»?
- Почему релятивистские ядра ускорять легче, чем протоны, а протоны легче чем электроны?
- Что Вы знаете о радиодетектировании нейтрино сверхвысоких энергий? Приведите примеры установок по радиодетектированию. Желательно не только перечислить несколько названий экспериментов, но и пояснить их основные физические особенности (как всегда, при необходимости можно использовать рисунки из конспекта).
- В чём состоит проблема постоянной Хаббла [“Planck – SHoES/Hubble+Gaia tension”]?
- Имеются ли экспериментальные указания на связь источников гравитационных волн и КЛ, γ , нейтрино?
- Какие выводы следуют из измерений кривой вращения Галактики?
- Поясните физику радиоизлучения ШАЛ (широкого атмосферного ливня) – эффект Аскарьяна, геосинхротронное излучение.
- Чем удобна Антарктида для стратосферных экспериментов по детектированию радиоизлучения ШАЛ?
- Поясните физику черенковского излучения ШАЛ.
- Что такое фотодезинтеграция ядер и какова её роль в развитии ядерных и электромагнитных каскадов, инициируемых КЛ сверхвысоких энергий в межгалактической среде?
- Выпишите реакции рождения пар, двойного и тройного (триплетного) рождения пар, а так же комптоновского рассеяния для электронов в межгалактическом пространстве.
- Что Вы знаете об акустическом методе детектирования нейтрино сверхвысоких энергий?

- Что Вы знаете о флуоресцентном методе детектирования нейтрино сверхвысоких энергий?
- В чём заключается т.н. «аномалия АНИТЫ» [“ANITA anomaly”]?
- Найдите явный вид 4-псевдовектора N (стр. 376) в системе центра масс нейтрино и нуклона.
- В чём заключается т.н. «реакторная антинейтринная аномалия»?
- В чём заключается т.н. «резонансный» механизм нейтринорождения мезонов?
- Чем отличается «квазиупругоподобное» [“CCQE-like”] событие от квазиупругого [“CCQE”]?
- Что такое «кварк-лептонная дополнительность» [“Quark-lepton complementarity”]?
- Докажите, что матрица $||e^{ia_\ell - b_k} V_{k\ell}||$ унитарна. Остаётся ли она унимодулярной, если матрица $||V_{k\ell}||$ унимодулярна?
- Докажите, что флейворный состав дираковских нейтрино ν_k и антинейтрино $\bar{\nu}_k$ одинаков. Сформулируйте аналогичное утверждение для майорановских нейтрино.
- Докажите, что лагранжиан с майорановским массовым членом инвариантен относительно преобразования $\ell \mapsto e^{ia_\ell} \ell$, $V_{\ell k} \mapsto e^{-ia_\ell} V_{\ell k}$.
- Докажите, что интеграл столкновений общерелятивистского уравнения Больцмана тождественно обращается в нуль при термодинамическом равновесии в предположении T -инвариантности и при сохранении химических потенциалов (бозе-конденсат конечно не учитываем).
- Решите задачи из раздела «Механическая (игрушечная) модель» [“Mechanical (toy) model”].
- Докажите, что $P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta) = P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \Big|_{\delta \mapsto -\delta} = P(\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha)$.
- Докажите закон сохранения вероятности флейворных переходов нейтрино в вакууме.
- Докажите, что предположение о равенстве скоростей ν_k , иногда используемое в квантовомеханической теории нейтринных осцилляций (и публикуемое в солидных журналах), исключено экспериментально.
- Докажите формулу для вероятности флейворных переходов нейтрино в вакууме на стр. 501.
- Поясните на языке эффективных волновых пакетов почему нейтрино перестают осциллировать (а точнее, интерферировать) на очень больших (астрономических) расстояниях.
- Что Вы знаете об МСВ эффекте?
- Докажите унитарность оператора эволюции $\mathbf{S}(t)$.
- Докажите, что $\mathbf{S}(t) \equiv \mathbf{S}(t, 0) = \mathbf{S}(t, t_1) \mathbf{S}(t_1, 0)$.
- В каких случаях решение обобщённого уравнения Вольфенштейна сводится к решению стандартного

(не учитывающего поглощение нейтрино) уравнения. Как при этом модифицируются вероятности флейворных переходов?

- Найдите решение уравнения Вольфенштейна в классическом пределе.
- Какое отношение имеет уравнение Лиувилля – фон Нейманна [[“Liouville – von Neumann equation”](#)], описывающее эволюцию смешанных нейтрино в среде к системе общерелятивистских уравнений Больцмана, описывающих кинетику ранней Вселенной?
- Приведите примеры реакций, которые дают вклад в матрицу \mathbf{W} для ранней Вселенной.

Пожалуйста, сообщайте об ошибках и опечатках, найденных в лекциях и в этом списке вопросов.