
Экзаменационные вопросы по курсу «Элементы нейтринной физики и астрофизики»

(дата экзамена: 26 декабря, 2023 г.)

Обозначения:

- – Обязательные вопросы, которые будут задаваться случайным образом.
- – 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 (например, с компьютерными анимациями). Это безусловно не означает, что при ответах на остальные вопросы формулы, рисунки, таблицы и т.п. использовать нельзя.
- – Факультативные вопросы. Знание ответов приветствуется, но не требуется (т.е. влияние этих вопросов на общую оценку **неотрицательно**).
- – Нетрудно догадаться...

Примечания:

- При ответах допускается использование конспекта и любых материалов, выложенных на сайте http://theor.jinr.ru/~vnaumov/Eng/JINR_Lectures/NPA.html , или найденных Вами.
- Обратите внимание на Приложения в конспекте. Они не обязательны, но могут быть полезны при изучении основного материала.
- Использование иллюстраций из конспекта полезно (иногда неизбежно) при ответах на некоторые вопросы.^a Использование для тех же целей учебников и монографий тоже допускается, а обзоров или оригинальных научных статей приветствуется.
- Некоторые вопросы пересекаются, но так и задумано.
- Классификация вопросов по разделам часто не совпадает с оглавлением лекций, но отыскать «где про это написано» будет нетрудно.

^aНапример, когда в вопросе фигурирует ссылка на рисунок в конспекте, в дополнительных материалах, расположенных на вышеупомянутом сайте, или на веб-ссылках.

История

- В чём заключалась проблема непрерывного β -спектра, обнаруженного в экспериментах Чедвика [Chadwick, 1914]? Какая модель ядра была общепринятой в те годы?
- В чём заключалась гипотеза Паули [Pauli, 1930], объясняющая наблюдаемые загадки β -спектров?
- Что Вы знаете об открытии нейтрона [Chadwick, 1914] и о моделях предложенных Иваненко, Гайзенбергом и Майораной [Ivanenko, Heisenberg, Majorana, 1932]?
- Чем 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?
- 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?
- 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?
 - 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**» 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?
 - Что Вы знаете о физических принципах регистрации и идентификации событий в SNO?
 - Что Вы знаете о реакторных антинейтринных экспериментах?
 - Какие реакции используются в этих экспериментах для регистрации нейтринных событий?
 - В чём заключается важность измерения угла смешивания θ_{13} ?
 - В чём, по Вашему мнению, важность экспериментов SNO и KamLAND?
 - Что Вы знаете об эксперименте OPERA? В чём состояла основная задача этого эксперимента? Расскажите о методе регистрации 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**»?
 - Что Вы знаете об эксперименте T2K?
 - Что Вы знаете о глубоководных и подлёдных черенковских нейтринных телескопах?
 - Чем знамениты Эрн и Берт?

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 (или проверьте на примерах) формулу Гелл-Манна–Нишиджимы [Gell-Mann (1956), Nishijima & Nakano (1953)].
- 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.
- Докажите, что слабый заряженный адронный ток определяется пятью 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: В чём заключается $2p2h$ механизм? Что такое «взаимодействие в конечном состоянии» (“FSI”)? Что такое «обменный заряженный ток» (“MEC”)? «Внутриядерный каскад»?

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?
- Почему неэффективна реакция $D + D \rightarrow {}^4\text{He}$ в Солнце?
- Что Вы знаете о звездном нуклеосинтезе?
- Какие астрофизические явления 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 внешних влияний вроде столкновения Галактики с 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?

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?
- 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» ($\pi - K$) и «быстрых» нейтрино.
- В каких процессах могут генерироваться атмосферные τ -нейтрино?
- Объясните качественно соотношение потоков электронных, мюонных и τ -лептонных нейтрино в суммарном потоке АН.
- Какое отношение имеют АН к проблеме поиска распадов протона и нейтрон-антинейтронных осцилляций?
- Приведите примеры фейнмановских диаграмм, описывающих распад протона.
- Чем интересен распад протона для космологии?
- Что такое нейтрон-антинейтронные осцилляции?

-
- Каковы (по порядку величины) экспериментальные верхние пределы на время жизни протона для простейших мод распада?
 - Какие эксперименты по поиску распада протона Вам известны и какие методы используются 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?
 - Объясните связь между магнитной активностью Солнца и потоками КЛ у Земли.
 - 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.]
 - Каков современный экспериментальный статус проблемы астрофизических нейтрино?
 - Что Вам известно о событии IceCube-170922A?
 - Что такое активное галактическое ядро? радиогалактика? блазар?

-
- 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) АГН.
 - Что Вы знаете о ГЗК обрезании спектра первичных КЛ? Выведите формулу для порога рождения пиона при взаимодействии протона с реликтовым фотоном.
 - Что Вы знаете о **космогенных (ГЗК)** нейтрино? Выпишите основные реакции (фоторождение пионов, e^+e^- пар и т.д.), влияющие на энергетический спектр и флукс состав космогенных нейтрино.
 - Что такое фотодезинтеграция ядер и какова её роль в развитии ядерных и электромагнитных каскадов инициируемых КЛ сверхвысоких энергий в межгалактической среде?
 - Поясните связь ГЗК нейтрино и γ -излучения.
 - В чём разница между моделями образования КЛ, γ -квантов и нейтрино сверхвысоких энергий «**сверху вниз**» (“**top-down**”) и «**снизу вверх**» (“**bottom-up**”)? Приведите несколько характерных примеров.
 - 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 и нейтрино сверхвысоких энергий (выше $\sim 100 \text{ EeV}$)?
 - Объясните механизм ускорения Ферми второго порядка.
 - В чём заключается стохастический механизм ускорения Ферми?
 - Выведите формулу прироста энергии релятивистской частицы при столкновении с массивным объектом («**ракеткой**»). Выведите условия отражения заряженной частицы от «**магнитное зеркала**». 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 при стохастическом ускорении Ферми первого порядка.
 - Поясните физический смысл классификации типов событий в детекторе IceCube. Чем интересны события с рождением τ -лептона?

Геонейтрино

- Что Вы знаете о строении Земли? В чём заключается т.н. «Предварительная эталонная модель Земли» (PREM)?
- Что Вы знаете о механизмах генерации тепла в Земле? При чём тут метеориты?
- Каковы типичные энергии геофизических антинейтрино (ГА)?
- Какие процессы ответственны за образование основного потока ГА?
- Какова пороговая энергия детектирования ГА? [Вывести формулу.]
- Перечислите основные фоновые процессы в экспериментах по детектированию ГА.
- Каковы возможные (гипотетические) источники нейтрино высоких и сверхвысоких энергий (выше ~ 100 ГэВ) в центре Земли?
- В чём заключается гипотеза геореактора? При чём тут Габон?

СМВ и $C\nu B$

- Какова (примерно) температура, микроволнового электромагнитного излучения (СМВ)?
- Какова числовая плотность и средняя энергия реликтовых фотонов?
- Каков порядок величины анизотропии СМВ и в чём важность наблюдаемой неизотропности СМВ?
- В чём заключается причина анизотропии СМВ?

-
- Проанализируйте разложение температурных флуктуаций СМВ по сферическим гармоникам и объясните физический смысл углового спектра мощности СМВ.
 - Объясните причину появления нетривиального дипольного вклада в спектр мощности СМВ.
 - Что Вы знаете об Аттракторе Шепли (Shapley Attractor) и Дипольном Отталкивателе (Dipole Repeller)?
 - Выведите формулу для красного смещения СМВ.
 - 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.
 - 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 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 (классическое релятивистское уравнение Больцмана, основные реакции).
 - Что Вы можете рассказать об учёте смешивания нейтрино и эффекта преломления в кинетическом уравнении?

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?
- Подсчитать число физических фаз в вакуумной матрице 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 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 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.
- Выведите формулу для биунитарной диагонализации массовой матрицы 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.
- 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 \$\beta\$ -спектра](#)»?
- 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?

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

-
- 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 сегодняшний день проблемы нейтринной физики.

Нейтринные осцилляции в вакууме

- Что Вы знаете об экспериментах по изучению нейтринных осцилляций?
- Как зависит от энергии длина осцилляций нейтрино?
- Что Вы можете сказать о сохранении энергии в стандартной (KM) 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 (KM) теории нейтринных осцилляций представляются спорными? Почему эта теория не может справедлива 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 квантовой теории нейтринных осцилляций.
- Иерархия масштабов пространственно-временных областей в макроскопических фейнмановских диаграммах.
- Теория волновых пакетов в KM и КТП.

Нейтринные осцилляции в веществе^a

- Что Вы знаете об МСВ эффекте?

Разное (включая простые задачи)

- Что такое «многоканальная астрономия» (“multi-messenger astronomy”)?
- Чем объясняется огромная разница (5–6 порядков!) содержания ядер Лития, Бериллия и Бора в потоке галактических КЛ и в веществе Солнечной системы?
- Что Вы знаете о статусе проблемы антивещества (позитроны, антипротоны, антиядра) в контексте физики КЛ?
- 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 последних результатах экспериментов Pierre Auger и Telescope Array по измерению анизотропии КЛ сверхвысоких энергий и их интерпретации?
- Объясните возможную связь между разнообразием видов (genus diversity) и КЛ.
- Покажите, что кривая вращения спиральной галактики должна спадать как $1/\sqrt{r}$ при 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 темной материи, а не, например, 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 из первичного нуклеосинтеза» (“BBN neutrino”)?

^aУвы, этот раздел мы изучить не успели («Это мы не проходили, это нам не задавали...»).

- Что Вы знаете о радиодетектировании нейтрино сверхвысоких энергий? Приведите примеры установок по радиодетектированию [желательно не только название, но и основные физические особенности].
- Поясните физику радиоизлучения ШАЛ (широкого атмосферного ливня) – эффект Аскарьяна, геосинхротронное излучение.
- 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 ANITA»?
- В чём заключается т.н. «реакторная антинейтринная аномалия»?
- 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 интеграл столкновений общерелятивистского уравнения Больцмана тождественно обращается в нуль при термодинамическом равновесии и сохранении T -инвариантности и химических потенциалов.
- Решите задачи из раздела «Механическая (игрушечная) модель» (“Mechanical (toy) model”).
- Докажите, что $|m_{\beta\beta}| \leq m_\beta$.
- 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, что предположение о равенстве скоростей ν_k , иногда используемое в теории нейтринных осцилляций (и публикуемое в солидных журналах) категорически исключено экспериментально.

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