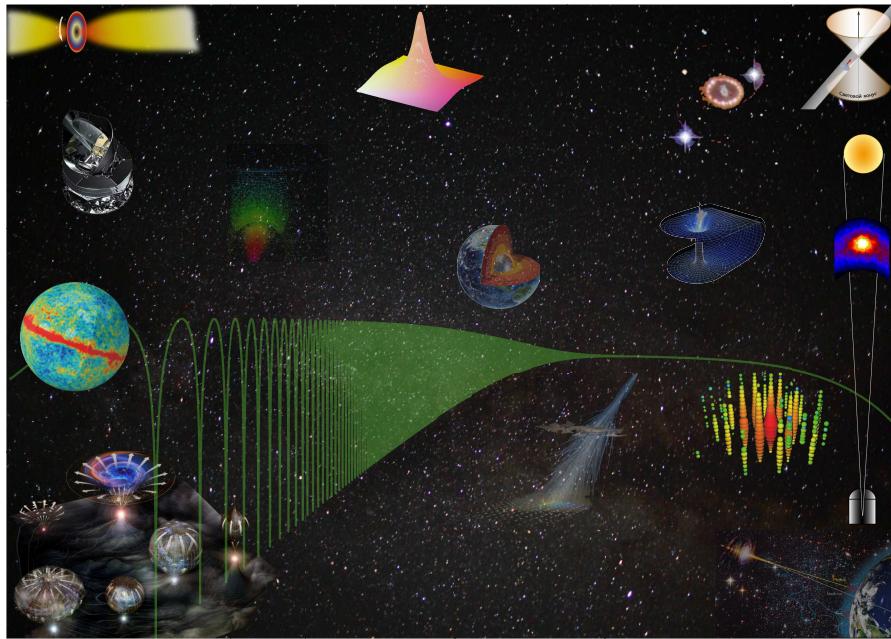


# Экзаменационные вопросы по курсу «Элементы нейтринной физики и астрофизики»



УНЦ ОИЯИ, Дубна

# 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.** Соответствующие темы затрагивались на лекциях лишь вскользь и знакомство с ними приветствуется, но не требуется, т.е. влияние этих вопросов на общую оценку [неотрицательно](#).
- Нетрудно догадаться...

# Примечания:

- Используйте для подготовки последнюю версию Конспекта «[Lecture notes](#)». <sup>a</sup>
- Обратите внимание на [Приложения](#) в Конспекте. Хотя формально они не обязательны, но всегда полезны, а в некоторых (редких) случаях необходимы при изучении основного материала; эти случаи либо указаны явно, либо ясны из контекста.
- Не забудьте, что раздел «[Cosmic Rays — short review supplement to sections “Atmospheric Neutrinos” and “Astrophysical Neutrinos”](#)» является [обязательной](#) частью курса.<sup>b</sup>
- При ответах на экзамене допускается использование файлов «[Lecture notes](#)», «[CR.pptx](#)» и других материалов на стр. [⟨http://theor.jinr.ru/~vnaumov/Eng/JINR\\_Lectures/NPA.html⟩](http://theor.jinr.ru/~vnaumov/Eng/JINR_Lectures/NPA.html).
- Использование иллюстраций и таблиц из Конспекта полезно (иногда необходимо) при ответах на некоторые вопросы, в частности, когда в вопросе фигурирует прямая ссылка на рисунок или таблицу. Использование для тех же целей учебников, монографий и даже (профессиональных) веб-страниц тоже допускается, а обзоров и оригинальных научных статей или епринтов приветствуется.
- Некоторые (немногие) вопросы частично пересекаются, но так и задумано.
- Классификация вопросов по разделам часто не совпадает с оглавлением лекций<sup>c</sup>, но отыскать «где про это написано» будет, надеюсь, нетрудно.

---

<sup>a</sup>[http://theor.jinr.ru/~vnaumov/Eng/JINR\\_Lectures/Lectures\\_files/NPA\\_compressed.pdf](http://theor.jinr.ru/~vnaumov/Eng/JINR_Lectures/Lectures_files/NPA_compressed.pdf). Очень нечастые ссылки на страницы, номера разделов и формул относятся к этой версии.

<sup>b</sup>Последняя версия здесь: [http://theor.jinr.ru/~vnaumov/Eng/JINR\\_Lectures/Lectures\\_files/CR/CR.pptx](http://theor.jinr.ru/~vnaumov/Eng/JINR_Lectures/Lectures_files/CR/CR.pptx); версия без анимаций (для тех, у кого нет MS PowerPoint или его аналога, напр., WPS Office) здесь: [http://theor.jinr.ru/~vnaumov/Eng/JINR\\_Lectures/Lectures\\_files/CR/CR.pdf](http://theor.jinr.ru/~vnaumov/Eng/JINR_Lectures/Lectures_files/CR/CR.pdf)

<sup>c</sup>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 «отцов-основателей» знать тоже надо.

# 1. История

- В чём заключалась проблема непрерывного  $\beta$ -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  $^{14}\text{N}$ ], называемая так же «азотной катастрофой»? Какой результат был получен в экспериментах Гитлера–Герцберга [Heitler-Herzberg, 1929] и Разетти [Rasetti, 1929]?
- В чём заключалась гипотеза Паули [Pauli, 1930], объясняющая наблюдаемые загадки  $\beta$ -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  $\beta$ -распада Ферми [Fermi, 1933]?
- Прокомментируйте результат Бёте и Пайрлса [Bethe & Peierls, 1934] по оценке сечения обратного  $\beta$ -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  $\tau$ -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  $\theta_{13}$ ?
- 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 и слабый гиперзаряд?
- Чем отличаются слабые токи первого и второго рода? Какие из них отсутствуют в Стандартной Модели?
- Сформулируйте теорему Вайнберга [Weinberg, 1958] для слабых токов первого и второго рода.
- Что такое  $G$ -чётность?
- 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 неполяризованного 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.
- От какого числа структурных функций зависят эксклюзивные и инклузивные дифференциальные сечения рассеяния нейтрино на неполяризованном нуклоне?
- Выразите структурные функции нуклона для CCQE реакций через формфакторы квазиупругого  $\nu N$ -рассеяния.
- Как связаны аксиальный и псевдоскалярный формфакторы нуклона?
- Что называется аксиальной массой нуклона?
- Как связаны собственные значения операторов  $G$  и  $C$ ?
- Что Вы знаете о скалярной и тензорной массах нуклона?
- Поляризационная матрица плотности и вектор поляризации лептона в  $\nu N$  взаимодействиях.
- Как (примерно) зависит от энергии  $E_\nu$  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» [“МЕС”]? «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 отдаленном 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  $\sim 100$  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  $\sim 100$  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  $\sim 1$  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  $\sim 10$  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 и астрофизические  $\tau$ -нейтрино?
- Объясните качественно соотношение потоков электронных, мюонных и  $\tau$ -лептонных (анти)нейтрино в суммарном потоке АН.
- Приведите примеры фейнмановских диаграмм, описывающих распад протона.
  - Чем интересен распад протона для космологии?
  - Что такое нейtron-антинейtronные 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 «Вояджеров» [“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,  $\gamma$  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 пинов, т.е. рождения пинов 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/фотоэррозию ядер (выписать и пояснить цепочку уравнений переноса), перечислить основные реакции рождения нейтрино, электронов и позитронов в межгалактической среде.
- Поясните связь ГЗК нейтрино и  $\gamma$ -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  $\gamma$ -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,  $\gamma$ -квантов и нейтрино сверхвысоких энергий (выше  $\sim 100$  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 («**теннисной ракеткой**»).<sup>a</sup> 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?

---

<sup>a</sup>Формулы из раздела «**Ускорение релятивистских частиц**» [“**Relativistic particle acceleration**”] можно не выводить, но нужно пояснить их физический смысл и объяснить (прокомментировать) рисунок (зависимость  $\langle \cos \theta \rangle$  от скорости  $v$ ) из того же раздела.

- 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  $\tau$ -лептона?

## 5. Геонейтрино

- Что Вы знаете о строении Земли? В чём заключается т.н. «Предварительная эталонная модель Земли» [“Preliminary Reference Earth Model (PREM)”?]
- Что Вы знаете о механизмах генерации тепла в Земле? При чём тут метеориты?
- Каковы типичные энергии геофизических антинейтрино ( $\bar{\nu}$ )?
- Какие процессы ответственны за образование основного потока  $\bar{\nu}$ ? При ответе можно воспользоваться соответствующей таблицей в Конспекте.
- Какова пороговая энергия детектирования  $\bar{\nu}$  в реакции обратного бета-распада? [Вывести формулу и найти число.] Поясните детали детектирования антинейтрино.
- Перечислите основные фоновые процессы в экспериментах по детектированию  $\bar{\nu}$ .
- Прокомментируйте результаты детектирования  $\bar{\nu}$  в экспериментах KamLAND и Borexino.
- Каковы возможные (гипотетические) источники нейтрино высоких и сверхвысоких энергий (выше  $\sim 100$  ГэВ) в Земле?
- В чём заключается гипотеза геореактора? При чём тут Габон?

## 6. 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 Репеллере (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 ([СνВ](#)), 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 СνВ 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 маорановских нейтрино.
- В чём разница между естественной и обратной иерархиями масс нейтрино?
- Приведите 3–4 примера процессов, идущих с нарушением индивидуальных лептонных чисел  $L_e$ ,  $L_\mu$  и  $L_\tau$ , 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 диагонализована с помощью биунитарного преобразования. Выведите отсюда формулу для диагонализованных 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  $\beta$ -распада. Как учитывается переходы в возбуждённые состояния и отдача дочернего ядра?
  - Что такая эффективная масса нейтрино от  $\beta$ -распада,  $m_\beta$ ? Выберите формулу для  $m_\beta$  как функции параметров смешивания.
  - Что означает термин «график Кури» [Kurie plot = Kurie-Fermi = Fermi plot]<sup>b</sup>?
  - В чём сложность измерений «на конце  $\beta$ -спектра» и как решается эта проблема?
  - Что Вы знаете о современных экспериментальных ограничениях на величину  $m_\beta$ ? В частности, прокомментируйте недавние результаты эксперимента KATRIN.
  - Поясните механизм двойного безнейтринного  $\beta$ -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?

---

<sup>b</sup>В русскоязычной литературе чаще говорят о графике Кюри или Ферми-Кюри.

- Что Вы знаете о результатах эксперимента «Heidelberg-Moscow» по поиску  $0\nu\beta\beta$ -распада?
- Теорема Шехтера-Валле (Schechter-Valle = “Black-box” theorem).
- 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 флейворм.
- Перечислите и прокомментируйте главные нерешенные на сегодня проблемы нейтринной физики.

## 8. Нейтринные осцилляции в вакууме

- 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  $2\nu$  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

- 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? Выпишете пример эффективного лагранжиана.
- Выведите явный вид потенциала для электронного нейтрино в нормальной (однородной, изотропной  $C$ -нечётной) среде.
- Найдите решение уравнения Вольфенштейна для  $2\nu$  системы в нормальной непоглощающей (т.е. достаточно тонкой) среде постоянной плотности. Проанализируйте решение.
- Что называется осцилограммой? 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  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  и  $\nu_\tau$  с нуклонами?
- Прокомментируйте (поясните «на пальцах») поведение вероятностей выживания и переходов  $P_{\mu\mu}$ ,  $P_{ss}$ ,  $P_{\mu s}$  и  $P_{s\mu}$ , показанных на рисунках в разделе «Среда постоянной плотности и состава» [“Matter of constant density and composition”].
- Что называется «объектом Торна-Жйтков» [“Thorne-Żytkow object (TŻO)”?]
- Приведите реалистичные примеры случаев, когда при расчёте вероятностей осцилляций нейтрино необходим (но не достаточен) учёт поглощения нейтрино в среде.

## 10. Разное и в перемешку (включая простые задачи)

- Что Вы знаете о потоке солнечных «тепловых» [“thermal”] нейтрино?
- Почему в Солнце не идёт реакция  ${}_1^2D + {}_1^2D \rightarrow {}_2^4He$ ?
- А чем плоха реакция  ${}_1^2D + {}_1^2D \rightarrow {}_2^4He + \gamma$ ?
- Почему огромный поток солнечных нейтрино не мешает детектированию генейтрино?
- Что понимается под термином «Большой единый нейтринный спектр» [“Grand unified neutrino spectrum (GUNS)”? Какие участки GUNS пока не изучены экспериментально?
- 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?
- 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 [“Baw shock”].

- Что такое «[многоканальная астрономия](#)» [“multi-messenger astronomy”]?
- Где примерно прекращается влияние солнечного ветра на галактические КЛ (название слоя, приблизительное расстояние)? Откуда нам это известно?
- 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.
- Почему звёздный нуклеосинтез останавливается на ядрах железа?
- Что Вы знаете о структуре гелиосферы? Какие новые факты получены Вояджерами?
- Докажите, что в отсутствие тёмного гало кривая вращения спиральной галактики должна спадать как  $1/\sqrt{r}$  на больших расстояниях  $r$  от галактического центра. Естественно, следует использовать приближение цилиндрической симметрии.
- 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 иллюстрации из Конспекта).
- В чём состоит проблема постоянной Хаббла [“[Planck – SHoES/Hubble+Gaia tension](#)”]?
- Почему химические потенциалы газа частиц и античастиц в Ранней Вселенной равны по модулю, но противоположны по знаку?

- Имеются ли экспериментальные указания на связь источников гравитационных волн с КЛ,  $\gamma$ -излучением, нейтрино?
- Какие выводы следуют из измерений кривой вращения Галактики?
- Поясните качественно физику радиоизлучения ШАЛ (широкого атмосферного ливня) – эффект Аскарьяна, геосинхронное излучение.
- Что такое «[Ланиакея](#)» [[“Laniakea”](#)]? Как соотносятся размеры Ланиакеи со шкалой ГЗК?
- Чем удобна Антарктида для стрatosферных экспериментов по детектированию радиоизлучения ШАЛ при сверхвысоких энергиях?
- 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 ANITA](#)» [[“ANITA anomaly”](#)]?
- Найдите явный вид 4-псевдовектора  $N_\alpha = \epsilon_{\alpha\beta\gamma\delta} p^\beta k^\gamma q^\delta$  в системе центра инерции (СЦИ) нейтрино и нуклона,  $N^* = (0, \mathbf{N}^*)$ .
- 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  $\nu_k$  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  $\nu_k$ , иногда используемое в квантовомеханической теории нейтринных осцилляций (и публикуемое в солидных журналах), исключено экспериментально.
- Выберите формулу для вероятности флейворных переходов нейтрино в вакууме.
- Поясните на языке эффективных волновых пакетов почему нейтрино перестают осциллировать (а точнее, интерферировать) на очень больших (астрономических) расстояниях.
- Что Вы знаете об MCB эффекте?
- Докажите унитарность оператора эволюции  $S(t)$ .
- Докажите тождество  $S(t) \equiv S(t, 0) = S(t, t_1)S(t_1, 0)$ ,  $0 \leq t_1 \leq t$ .
- В каких случаях решение обобщённого уравнения Вольфенштейна (с комплексным потенциалом) сводится к решению стандартного (не учитывающего поглощение нейтрино) уравнения. Как при этом модифицируются вероятности флейворных переходов?
- Найдите решение уравнения Вольфенштейна в классическом пределе.
- Как связано уравнение Лиувилля – фон Нейманна [“Liouville – von Neumann equation”], описывающее эволюцию смешанных нейтрино в среде, с системой общерелятивистских уравнений Больцмана, описывающих кинетику ранней Вселенной?
- Приведите примеры реакций, которые дают вклад в матрицу  $W$  для ранней Вселенной.

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

