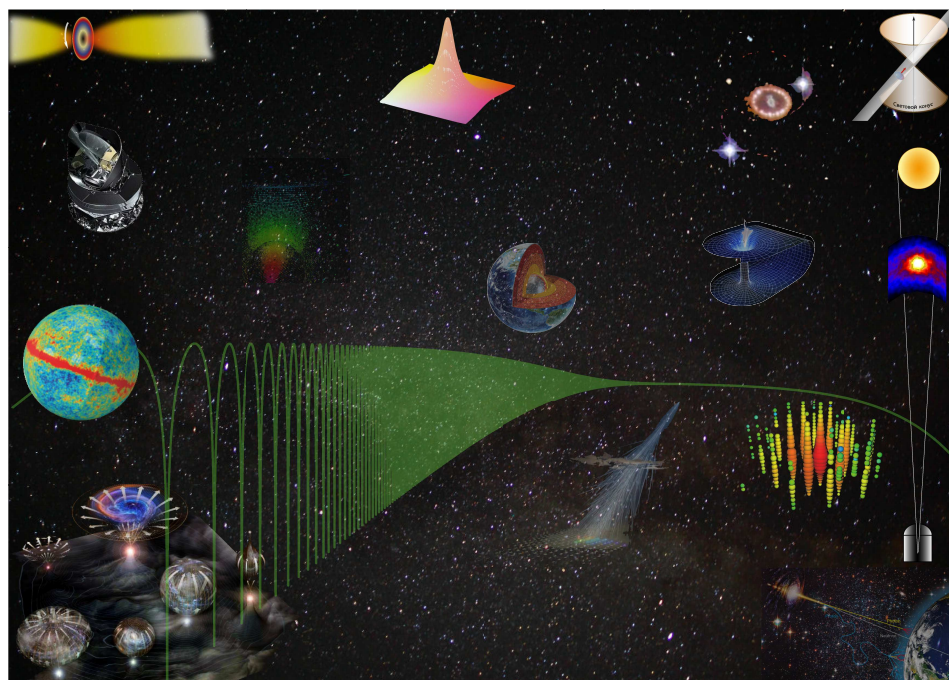


Экзаменационные вопросы по курсу «Элементы нейтринной физики и астрофизики»

для студентов профиля «Фундаментальная и прикладная ядерная физика»
филиала ФФ МГУ в Дубне



ОИЯИ, Дубна, Октябрь 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...

Примечания:

- При ответах на экзамене/зачёте допускается использование файлов «Lecture notes», «CR.pptx» и любых других материалов со страницы http://theor.jinr.ru/~vnaumov/Eng/JINR_Lectures/NPA.html.
- Используйте для подготовки октябрьскую версию «Lecture notes» (файл «NPA_compressed.pdf»); ссылки на страницы, номера разделов и формул относятся именно к этой версии.
- 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 версия без анимаций «CR.pdf» – для тех, у кого нет MS PowerPoint или его аналога, например, WPS Office) является **обязательной** частью курса.
- 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 (стр. 1007–1022)^a, но отыскать «где про это написано» будет, надеюсь, нетрудно.

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

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 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?
- Что такое мюография («Мюонная радиография»)?
- 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 этих 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 и его основных результатах?
- Что Вы знаете о глубоководных и подлёдных черенковских нейтринных телескопах (Baikal NT/GVD, AMANDA, IceCube, ANTARES, NESTOR, KM3NeT,...)?
- Чем знамениты Эрнест и Бертрам?
- Что Вы знаете о «[мюографии](#)» («[мюонной томографии](#)»)?
- Что Вы знаете о «[нейтринной томографии](#)»?

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?

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 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 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?

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 (ГАН)?
- Какие процессы ответственны за образование основного потока ГАН?
- Какова пороговая энергия детектирования ГАН в реакции обратного бета-распада? [Вывести формулу и найти число.] Поясните детали детектирования антинейтрино.
- Перечислите основные фоновые процессы в экспериментах по детектированию ГАН.
- Прокомментируйте результаты детектирования ГАН 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?

Космические лучи, атмосферные нейтрино

- Что такое ядерный и электромагнитный каскады в атмосфере? Что называется «широким атмосферным ливнем»?
- Перечислите основные реакции, в которых рождаются атмосферные нейтрино и антинейтрино (далее АН) с энергиями ниже ~ 1 ТэВ.
- В чём заключаются геомагнитные эффекты космических лучей (КЛ)?
- 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?

- 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 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?

- 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?
- 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.
- 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?

Разное и вперемешку (включая простые задачи)

- Прокомментируйте рисунки на стр. 62, 63 и 66.
- Что Вы знаете о потоке солнечных «**тепловых**» [“thermal”] нейтрино?
- Почему в Солнце не идёт реакция ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^4_2\text{He}$? А чем плоха реакция ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^4_2\text{He} + \gamma$?
- 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?
- 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?
 - 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?
 - 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?
 - 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?
- 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).

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