

Задачи к экзамену по курсу “Астрофизика частиц” (декабрь 2011)

1. Стерильное нейтрино и нуклеосинтез.

Пусть, в дополнение к частицам и взаимодействиям Стандартной модели, в Природе имеется стерильное нейтрино с массой M , смешивающееся с обычными нейтрино.

1. Ограничить его параметры (M и смешивание) из условия самосогласованности первичного нуклеосинтеза.
2. Оценить параметры этого нейтрино, которые могли бы помочь улучшить согласие теории с наблюдательными данными по содержанию первичных ${}^7\text{Li}$ и/или ${}^4\text{He}$.

2. Частицы с произвольным зарядом.

Используя различные обсуждавшиеся на лекциях методы, ограничить, возможно большим числом способов, из астрофизических данных параметры частиц с произвольным электрическим зарядом Q и массой M , не испытывающих никаких других взаимодействий. Рассмотреть случаи $Q \ll 1$ и $Q \gg 1$.

3. Кривые блеска сверхновых и зависимость G_F от точки пространства-времени.

Как обсуждалось на лекции, спадение блеска сверхновых типа Ia определяется бета-распадом ядер ${}^{56}\text{Ni}$ и ${}^{56}\text{Co}$. Скорость спадения блеска оказывается поэтому чувствительной к значению постоянной Ферми G_F . Используя кривые блеска конкретных далеких и близких сверхновых, приведенные на сайте проекта UNION2, ограничить вариации G_F в зависимости от красного смещения z и, для больших z , от направления в пространстве. Какую безразмерную комбинацию постоянных меряет на самом деле этот метод?

4. Аксионоподобная частица, взаимодействующая с электронами.

Как отмечалось на лекции, функция светимости белых карликов не противоречит существованию аксиона или похожей на него частицы, взаимодействующей с электронами. Пренебрегая другими каналами рождения, оценить по порядку величины скорость рождения таких аксионов в Солнце из электронов. Ограничить константу взаимодействия аксиона с электроном из времени жизни Солнца. Сравнить с оценками из функции светимости белых карликов.

5. Страннушечки и нейтронные звезды.

Назовем страннушечкой каплю вырожденного Ферми-газа, состоящего из кварков трех типов u , d , s .

1. Оценить плотность страннушечки.
2. Показать, что средняя энергия кварка в страннушечке может быть ниже, чем средняя энергия кварка в обычном веществе, состоящем из нуклонов, то есть страннушечки могут быть энергетически выгоднее нуклонов.
3. Описать смерть и оценить время жизни нейтронной звезды, поглотившей страннушечку.

4. Учитывая, что нейтронные звезды постоянно бомбардируются космическими лучами, но пока не умерли, ограничить сверху вероятность рождения страннушечки в нуклон-нуклонном столкновении с энергией в системе центра масс 10 ТэВ. Считать, что наблюдаемый на Земле сейчас поток космических лучей равен потоку в любой точке Галактики в любой момент времени.
5. Сравнить полученную в предыдущем пункте вероятность с обратным числом нуклон-нуклонных столкновений за все время работы Большого адронного коллайдера.

6. Резонансный слой в Солнце.

Рассмотрим теорию с парафотоном – векторным полем, аналогичным фотону, но имеющим небольшую массу m . За счет смешивающего кинетического члена $\chi F_{\mu\nu} B_{\mu\nu}$ в лагранжиане ($F_{\mu\nu}$ и $B_{\mu\nu}$ – тензоры напряженностей фотонного и парафотонного полей, соответственно, χ – константа) фотоны могут превращаться в парафотоны в процессе распространения. Подобно случаю нейтрино или аксиона, вероятность превращения может резонансно усиливаться в присутствии плазмы.

1. Воспользовавшись любой приблизительной, но реалистичной моделью Солнца (найти в литературе или интернете), найти параметры парафотона, для которого резонансное превращение происходило бы на расстоянии в $\sim 0.6R_{\odot}$ от центра Солнца, где R_{\odot} – радиус Солнца. Оценить толщину резонансного слоя.
2. Описать возможное влияние такого резонансного слоя на солнечную физику – заметим ли мы его? Если да, то какие ограничения на параметры парафотонов получаются из того факта, что мы его не заметили?

7. Космические лучи сверхвысоких энергий и диффузный гамма-фон.

Как обсуждалось на лекции, космические протоны сверхвысоких энергий долетают до нас не со всей Вселенной. При энергиях свыше $\sim 7 \times 10^{19}$ эВ длина пробега протона определяется эффектом ГЗК.

1. Среди вторичных продуктов ГЗК-реакции имеются фотоны, которые в свою очередь создают электромагнитный каскад, доходящий до Земли в виде диффузного гамма-излучения. Используя оценку диффузного потока фотонов с энергиями \sim ГэВ, полученную по данным спутника FERMI (найти в литературе), ограничить по порядку величины суммарную интенсивность всех источников протонов с энергиями $\gtrsim 7 \times 10^{19}$ эВ (во всей Вселенной). Сравнить, с учетом размера ГЗК-сферы, с наблюдаемым потоком космических лучей этих энергий.
2. При энергиях ниже порога ГЗК-реакции протоны все равно не распространяются сколь угодно далеко, так как испытывают другие взаимодействия с фоновым излучением. Оценить сечение этого взаимодействия и длину свободного пробега протонов с энергиями от $\sim 10^{19}$ эВ до $\sim 7 \times 10^{19}$ эВ. Повторить рассуждения пункта 1 для этих энергий.