

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Московский физико–технический институт
(государственный университет)

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
Д.А. Зубцов
«__» _____ 2013 г.

ПРОГРАММА

по курсу ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА
по направлению 010900 «Прикладные математика и физика»
факультет ВСЕ ФАКУЛЬТЕТЫ
кафедра теоретической физики
курс V
семестр 10
лекции – 34 часа Экзамен – нет
практические (семинарские)
занятия – 34 часа Зачет – 10 семестр
лабораторные занятия – нет
Самостоятельная работа – 2 часа в неделю
ВСЕГО ЧАСОВ – 68

Программу и задание составил
д.ф.-м.н. С. В. Троицкий

Программа принята на заседании
кафедры теоретической физики
«__» _____ 2013 года

Заведующий кафедрой



Ю.М. Белоусов

Астрофизика частиц, часть 2

Аннотация.

Астрофизика частиц занимается изучением свойств элементарных частиц методами астрофизики и изучением свойств астрофизических объектов методами физики частиц.

План курса

1. Вырожденные звезды: строение и эволюция, ограничения на новую физику
 - вырожденные звезды - белые карлики: их физическое описание, функция светимости, ограничения на новые частицы из скорости остывания
 - Пример: аксион-электронное взаимодействие.
 - нейтронные звезды, пульсары и магнетары
 - Пример 1: Стабильность нейтронных звезд и безопасность Большого адронного коллайдера.
 - Пример 2: Эффекты сверхсильного магнитного поля. Нестандартные взаимодействия нейтрино.
2. Астрономия высоких энергий
 - диффузное гамма-излучение. FERMI bubbles.
 - Пример: поиск сигналов аннигиляции или распадов слабовзаимодействующих частиц темной материи в гамма-излучении.
 - точечные источники в МэВ-ГэВ диапазоне
 - активные ядра галактик: определение, классификация, структура и источники энергии, объединенная схема
 - блазары и IR/TeV кризис

- Пример: смешивание фотонов с новыми частицами - осцилляции, поляризационные эффекты, длина свободного пробега.
3. Нефотонная астрономия
- нейтрино
 - детектирование нейтрино
 - солнечные нейтрино, гелиосейсмология и проблемы солнечных моделей
 - Пример: концентрация частиц темной материи в центре Солнца
 - астрофизические нейтрино высоких энергий
 - космические лучи (протоны и ядра)
 - Пример: антивещество в космических лучах низкой энергии
 - космические лучи высоких энергий (широкие атмосферные ливни)
4. Космические частицы сверхвысоких энергий
- экспериментальные результаты, проблемы и противоречия
 - ускорение частиц до сверхвысоких энергий
 - распространение частиц сверхвысоких энергий
 - Пример: модели неускорительного происхождения наиболее энергичных частиц - сверхтяжелая темная материя, топологические дефекты
5. Ограничения на новые частицы из эволюции Вселенной
- темная материя и перезакрытие Вселенной
 - нуклеосинтез
6. Астрофизические ограничения на другие модели новой физики
- изменение со временем констант взаимодействия

- электромагнитные взаимодействия нейтрино
- масса и заряд фотона

Литература

(Ссылки на статьи и обзоры по отдельным темам даются на лекциях)

1. *B.W. Carroll, D.A. Ostlie.* «An introduction to modern astrophysics. – Pearson/Addison Wesley, 2007.
2. *G.G. Raffelt.* Stars as laboratories for fundamental physics. – Univ. of Chicago Press, 1996.
3. *А.В. Засов, К.А. Постнов.* Общая астрофизика. – Век-2, 2006.
4. *C.D. Dermer, G. Menon.* High energy radiation from black holes: gamma rays, cosmic rays, and neutrinos. – Princeton University Press, 2009.
5. *F.A. Aharonian.* Very high energy cosmic gamma radiation. – World Scientific, 2004.
6. *M. Vietri.* «Foundations of high-energy astrophysics. – Univ. of Chicago Press, 2008.

**Формулы, предполагающиеся известными из
предшествующих курсов**
(система $\hbar = c = k = 1$)

1. Потери на излучение движущейся заряженной частицы в электромагнитном поле:

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} = -\frac{2}{3} \frac{q^4}{m^4} \mathcal{E}^2 \left[(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})^2 - (\mathbf{E} \cdot \mathbf{v})^2 \right],$$

где q – заряд, m – масса частицы, \mathcal{E} – ее энергия, t – время, \mathbf{E} и \mathbf{B} – электрическое и магнитное поле.

2. Спектр синхротронного излучения:

$$\frac{d\mathcal{E}}{d\nu dt} = \frac{\sqrt{3}q^3 B \sin \theta}{m} \frac{\nu}{\nu_c} \int_{\nu/\nu_c}^{\infty} K_{5/3}(y) dy,$$

где q – заряд, m – масса частицы, \mathcal{E} – ее энергия, ν – частота излучения, t – время, B – величина магнитного поля, $\nu_c = (3/2)\gamma^2 q B \sin \theta / (2\pi m)$, K – функция Макдональда, θ – угол между полем и скоростью.

3. Энергетические уровни частицы в магнитном поле:

$$\mathcal{E}_n = m \sqrt{1 + \left(\frac{p}{m}\right)^2 + 2n \frac{B}{B_{\text{crit}}}},$$

где \mathcal{E} – энергия, n – номер уровня, p – импульс, B – магнитное поле, $B_{\text{crit}} = m^2/q$, q – заряд, m – масса частицы.

4. Радиус Шварцшильда:

$$R_S = 2GM,$$

где G – гравитационная постоянная, M – масса тела.

5. Спектр теплового излучения:

$$u = \frac{\omega^2}{\pi^2} \frac{\omega}{e^{\omega/T} - 1},$$

где u – спектральная плотность мощности излучения, ω – частота, T – температура.

6. Распределение Ферми–Дирака:

$$n = \frac{1}{e^{(E-\mu)/T} + 1},$$

где n – число заполнения уровня, E – энергия этого уровня, μ – химический потенциал, T – температура.

Задачи

1. Вывести условие гидростатического равновесия для звезды. Вывести из него теорему вириала для звезды. Оценить температуру звезды, зная ее массу и радиус.
2. Показать, что радиус нормальной звезды приближенно пропорционален ее массе.
3. Показать, в рамках рассмотренного на лекции игрушечного примера, что поправка $\delta\tau$ ко времени горения водорода τ в звезде связана с величиной дополнительных потерь энергии ϵ_x соотношением $\delta\tau/\tau \approx -\epsilon_x/\epsilon_{\text{нuc}}$, где $\epsilon_{\text{нuc}}$ – основные потери, связанные с термоядерными реакциями.
4. Найти зависимость энерговыделения на единицу массы звезды ϵ от плотности вещества ρ и температуры T для термоядерных реакций, связанных с двух- и трехчастичным туннелированием под кулоновский барьер.
5. (★) Пусть гипотетическая псевдоскалярная частица χ массы m_χ взаимодействует с электронами e юкавским образом, то есть лагранжиан взаимодействия $\mathcal{L}_{\text{int}} =$

$Y\chi\bar{e}\gamma_5e$, где Y – константа, γ_5 – матрица Дирака. Считая, что потери энергии в звезде, связанные с этой частицей, определяются, в основном, комптоновским процессом ($\gamma + e \rightarrow e + \chi$), получить ограничение на Y из анализа шаровых звездных скоплений двумя способами: (а) из продолжительности горения гелия, (б) из задержки гелиевой вспышки.

6. (★) Найти связь между константами взаимодействия аксиона квантовой хромодинамики с кварками и с фотоном.
7. (★) Считая электроны тяжелыми по сравнению с аксионами, а среду нерелятивистской и невырожденной, оценить сечение процесса Примакова.
8. Предположим, что помимо остывания белых карликов имеет место процесс гибели части из них (например, за счет взрывов сверхновых типа Ia или еще по какой-либо причине) с характерным временем жизни τ . Оценить поправку к закону остывания белых карликов, связанную с этим эффектом. Ограничить τ из экспериментальной функции светимости белых карликов.
9. Оценить радиус нейтронной звезды массы M .
10. Показать, что магнитное поле одиночной нейтронной звезды препятствует долетанию протонов и ядер сверхвысокой энергии до ее поверхности.
11. В рамках рассмотренных на лекции гипотетических моделей оценить вероятность попадания на поверхность нейтронной звезды, входящей в состав тесной двойной системы, микроскопических черных дыр, рожденных при взаимодействии космических лучей сверхвысоких энергий с веществом звезды-компаньона.
12. Оценить время жизни нейтронной звезды после перехода в режим макроскопической аккреции на попавшую в нее микроскопическую черную дыру.

13. Назовем страннушечкой каплю вырожденного Ферми-газа, состоящего из кварков трех типов u , d , s .
- Оценить плотность страннушечки.
 - 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.
 - Описать смерть и оценить время жизни нейтронной звезды, поглотившей страннушечку.
 - 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.
 - Сравнить полученную в предыдущем пункте вероятность с обратным числом нуклон-нуклонных столкновений за все время работы Большого адронного коллайдера.
14. (★) Вывести и решить уравнение диффузии галактических космических лучей в модели “leaky box”.
15. Сравнить гамма-излучение от Солнца и от центра Галактики, связанное с распадами или аннигиляцией слабозаимодействующих частиц темной материи. Масса частицы $M = 20$ ГэВ.
16. Рассмотрим некоторую звезду горизонтальной последовательности. Если она излучает очень легкие ($m \lesssim 10^{-12}$ эВ) аксионоподобные частицы, то по пути от звезды до наблюдателя часть из них будет конвертироваться в фотоны; энергия этих фотонов будет порядка температуры внутри звезды. Оценить поток та-

ких фотонов как функцию аксион-фотонной константы M и ограничить M из того факта, что звезды не являются источниками высокоэнергичного излучения.

17. Оценить параметры (массу и аксион-фотонную константу) аксиноподобной частицы, которая могла бы объяснить наблюдение фотонов с энергиями выше 1 ТэВ от блазара 3С 66А (красное смещение $z = 0.44$).
18. Получить из уравнений Солнца выражение для собственных чисел малых адиабатических колебаний с длиной волны, малой по сравнению с размером Солнца.
19. (★) Показать, что для потоков фотонов Φ_γ и нейтрино Φ_ν с энергией E , рождающихся в распадах π -мезонов, приближенно выполняется соотношение

$$\int \Phi_\gamma(E) dE = 2 \int \Phi_\nu(E) dE.$$

20. Пусть имеется популяция астрофизических источников нейтрино высоких энергий, равномерно распределенных во Вселенной, так что математическое ожидание для расстояния от нас до ближайшего источника равно D . Пусть угловое разрешение нейтринного телескопа порядка 1° . Что будет, с наибольшей вероятностью, раньше обнаружено – ближайший источник или диффузный фон от неразрешенных источников? Какова вероятность обратного?
21. Найти максимальную глубину (в г/см^2) развития адронного каскада широкого атмосферного ливня.
22. Вывести приведенную на лекции формулу, описывающую продольное развитие электромагнитной компоненты широкого атмосферного ливня.

Подписано в печать 01.06.12. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 0,5. Тираж 50 экз. Заказ № 152

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский физико-технический институт (государственный университет)»
E-mail: rio@mail.ru

Отдел оперативной полиграфии «Физтех-полиграф»
141700, Моск. обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9