

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

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
О.А. Горшков
« ___ » _____ 2013 г.

ПРОГРАММА

по курсу ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА
по направлению 010900 «Прикладные математика и физика»
факультет ВСЕ ФАКУЛЬТЕТЫ
кафедра теоретической физики
курс V
семестр 9
лекции – 32 часа Экзамен – 9 семестр
практические (семинарские)
занятия – 32 часа Зачет – нет
лабораторные занятия – нет
Самостоятельная работа – 2 часа в неделю
ВСЕГО ЧАСОВ – 64

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

Аннотация.

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

План курса

1. Введение

- что и как изучает астрофизика частиц; примеры
 - нейтрино от сверхновой 1987А, модели взрывов сверхновых типа II и ограничения на модели физики частиц. Пример: КК-гравитоны в моделях с большими дополнительными пространственными измерениями.
- базовые сведения из астрофизики: астрофизические объекты и их характеристики - потоки излучения, расстояния, основные физические параметры
- методы определения параметров источников: что могут и чего не могут современные астрономические инструменты

2. Ускорение частиц и нетепловое излучение в астрофизике

- излучение релятивистских частиц (синхротронное, изгибное, обратно-комptonовское)
- электромагнитные каскады
 - Пример 1. Вселенная как калориметр.
 - Пример 2. Взаимодействие фотонов с новыми частицами и (не)прозрачность Вселенной.
- основные механизмы ускорения
- максимальная энергия и спектр ускоренных частиц

3. Звезды: строение и эволюция, ограничения на новую физику

- внутреннее строение Солнца и обычных звезд

- Пример: общие ограничения на новую физику из факта существования звезд
- горение звезд и их эволюция. Ограничения на новые частицы из звездной эволюции
 - Пример: аксион-фотонное взаимодействие и звезды горизонтальной последовательности.

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. *A.B. 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 $\hbar = c = 1$)

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. В модели двухстадийного взрыва сверхновой II типа оценить промежуток времени между двумя нейтринными сигналами. Сравнить с наблюдениями SN1987A.
2. Ограничить сверху сечение нейтрино-нейтринного взаимодействия при соответствующих энергиях на основе того факта, что нейтрино от SN1987A не рассеялись на реликтовых нейтрино. Сравнить с сечением Стандартной модели.
3. Ограничить сверху массу нейтрино из продолжительности второго нейтринного сигнала от SN1987A, считая справедливой каноническую модель коллапса в части времени излучения основного нейтринного сигнала. Сравнить с другими ограничениями.
4. Ограничить сверху заряд нейтрино из продолжительности второго нейтринного сигнала от SN1987A, считая справедливой каноническую модель коллапса в части времени излучения основного нейтринного сигнала. Сравнить с другими ограничениями.

5. Уточнить обсуждавшееся на лекции ограничение на размер дополнительных пространственных измерений, рассмотрев конкретные процессы излучения калуцаклейновских гравитонов и используя более точные оценки соответствующих сечений. Сравнить получившиеся ограничения с ограничениями, полученными на Большом адронном коллайдере.
6. Какой минимальный угловой размер звезды можно измерить любительским телескопом с диаметром объектива 10 см, если сосед не топит баню? Если топит? Можно выбрать любую звезду, с которой будет удобно работать (яркую и удобно расположенную).
7. (а) Вывести формулу

$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{M(r)\rho}{r^2},$$

описывающую статическую звезду. P – давление, r – расстояние от центра звезды, $M(r)$ – масса, заключенная внутри этого радиуса, ρ – локальная плотность, G – гравитационная постоянная.

(б) Оценить статистическую ошибку в определении расстояния до конкретной цефеиды с использованием зависимости “период–светимость”, связанную с разбросом температур цефеид.

(в) Оценить систематическую ошибку в определении расстояния до цефеид населения I по сравнению с населением II, считая, что звезды населения I полностью состоят из водорода, а звезды населения II имеют примесь из $\sim 2\%$ железа.

8. (★) Рассмотрим модельное аксиально-симметричное (относительно луча зрения) скопление галактик, радиальное распределение плотности в котором описывается законом

$$\rho(r) = \rho_a \left(\frac{a}{r} \right)^b$$

(вкладом отдельных галактик по сравнению с общей темной материей пренебрежем). Пусть это скопление находится на расстоянии D_l от наблюдателя и играет роль гравитационной линзы для некоторых источников, находящихся на расстояниях $D_s^{(i)}$, $i = 1, 2, \dots$, от наблюдателя на оси симметрии скопления (везде речь идет об угломерных расстояниях).

(а) Для плоской Вселенной ($\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$) показать, используя зависимость угломерного расстояния от космологического параметра Ω_m , что последний может быть определен из сравнения наблюдаемых положений изображений двух источников, если известны красные смещения линзы z_l и источников $z_s^{(i)}$.

(б) Показать, что при сравнении положений трех источников можно определить Ω_m , не зная b .

(в) Оценить точность определения Ω_m для случая трех источников, если угловое разрешение телескопа θ_0 . То же для N источников. Для численной оценки взять угловое разрешение космического телескопа “Хаббл” и красные смещения линзы $z_l = 0.2$, источников $z_s^{(1)} = 1$, $z_s^{(2)} = 1.5$, $z_s^{(3)} = 2$.

(г) Когда источников много, можно определять и дополнительные космологические параметры, например, уравнение состояния темной энергии (параметр w). Оценить точность одновременного определения Ω_m и w для $N = 10$ источников с $1 \leq z_s^{(i)} \leq 4$ для $z_l = 0.2$ и углового разрешения телескопа “Хаббл”.

9. (★) Предположим, что Вселенная плоская, состоит из материи (Ω_m) и темной энергии ($1 - \Omega_m$); последняя имеет уравнение состояния $P/\rho = w(z)$. Пусть имеется сферический объект на красном смещении z , для которого мы измерили угловой размер θ и красное смещение ближнего и дальнего края (разница $\Delta z \ll z$). Нарисовать график для характерных космологических параметров.

10. Оценить расстояние до взорвавшейся звезды V838 Mon, воспользовавшись изображениями светового эха в разные моменты времени, доступными в интернете.
11. Будем считать, что сверхмассивные черные дыры в центрах активных галактик существуют в режиме стационарной аккреции, когда сила притяжения, действующая на плазму около черной дыры, уравновешивается давлением излучения этой самой плазмы (эддингтоновский режим).
 - (а) Для черной дыры массы найти соответствующую светимость (эддингтоновскую светимость), считая, что световое давление обусловлено томсоновским нерелятивистским рассеянием фотонов на электронах.
 - (б) В предположении о равномерном распределении плотности энергии между магнитным полем и излучением оценить магнитное поле вблизи черной дыры.
12. При наблюдениях блазара с красным смещением $z = 1$ были зарегистрированы хаотические изменения потока излучения на временном масштабе $\Delta t \sim 1$ час. Оценить сверху размер излучающей области. Сравнить с размерами Солнечной системы.
13. Многолетние наблюдения блазара с красным смещением $z = 1$, выявили поперечное к лучу зрения движение сгустка материи с кажущейся скоростью $2c$. Оценить Лоренц-фактор струи, направленной на наблюдателя.
14. Пусть блазар с красным смещением $z = 0.05$ является источником космических лучей сверхвысокой энергии – протонов с энергией $E = 10^{20}$ эВ (в системе отсчета наблюдателя). Предположим, что источник окружен областью магнитного поля B радиусом $r = 0.5$ Мпк. Оценить характерную энергию и регистрируемый наблюдателем поток синхротронных гамма-квантов, если регистрируемый поток таких космических лучей

$F = 0.01 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Оценить угловой размер получившегося протяженного источника. Поле считать однородным по величине и случайным по направлению; рассмотреть случаи $B = 10^{-6} \text{ Гс}$ и $B = 10^{-9} \text{ Гс}$. Потерями на пути между областью магнитного поля и наблюдателем пренебречь.

15. Гамма-кванты достаточно высоких энергий при прохождении через Солнечную систему могут интенсивно рождают электрон-позитронные пары на солнечном излучении. Считая спектр Солнца тепловым с температурой 0.5 эВ , оценить энергию гамма-излучения, для которой данный эффект будет существенным. Описать количественно влияние этого эффекта на изображения точечных гамма-источников и на диффузный гамма-фон при таких энергиях.
16. Солнечная система полна электронов и позитронов с энергиями во всяком случае вплоть до ТэВ , а также залита светом от Солнца. Считая спектр Солнца тепловым с температурой 0.5 эВ и взяв экспериментальные спектры электронов и позитронов по данным экспериментов AMS, ATIC, PAMELA, FERMI, HESS (найти в литературе или интернете), найти ожидаемый спектр обратно-комптоновского излучения от центральных областей Солнечной системы (наблюдаемый с земной орбиты как пятно угловым радиусом θ вокруг Солнца, для $\theta = 5^\circ$ и $\theta = 20^\circ$). Считать, что спектр электронов между Солнцем и орбитой Земли везде примерно одинаковый.
17. Найти приращение энергии за один цикл механизма Ферми при прохождении релятивистским электроном релятивистской ударной волны в плазме. Электрон подлетает к фронту волны с энергией E , под углом θ .
18. Предположительно, космические частицы с энергиями от $\sim 5 \times 10^{18} \text{ эВ}$ до $\sim 5 \times 10^{19} \text{ эВ}$ представля-

ют собой протоны внегалактического происхождения, ускоренные в различных астрофизических источниках. Одним из наиболее популярных массово работающих механизмов ускорения является ускорение в ударных волнах, обсуждавшееся на лекции. Однако данный механизм предсказывает показатель спектра ускоренных частиц -2 , в то время как наблюдаемый спектр мягче – с показателем -2.7 . Предложите и опишите количественно варианты согласования этих фактов, если известно, что влиянием на спектр поглощения протонов при распространении через Вселенную при этих энергиях можно в первом приближении пренебречь.

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