

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, изгибаемое, 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.
- 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.

4. Астрономия высоких энергий

- диффузное гамма-излучение. FERMI bubbles.
 - Пример: поиск сигналов аннигиляции или распадов слабо взаимодействующих 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.

5. 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)

6. 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

7. Ограничения на новые частицы из эволюции Вселенной

- темная материя и перезакрытие Вселенной
- нуклеосинтез

8. 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.
7. *M. Spurio.* Particles and astrophysics: a multimessenger approach. – Springer, 2015.

Задачи осеннего семестра

1. В модели двухстадийного взрыва сверхновой II типа оценить промежуток времени между двумя нейтринными сигналами. Сравнить с наблюдениями SN1987A. *Указание: воспользоваться формулой для потерь энергии на гравитационное излучение, изучив ее качественный вывод в Приложении А.4 к книге Постнова и Засова.*
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. *Указание: продолжительности сигналов определяются из рисунка; диапазон энергий зарегистрированных нейтрино: (6–35) МэВ в КИ, (12–23) МэВ в БПСТ, (20–40) МэВ в ИМВ. Более точная информация приведена в статье: В.Л. Дадыкин, Г.Т. Зацепин, О.Г. Рязская, УФН **158** (1989) 139.*
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 калуца-клейновских 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 (см. рис.). Сторона каждой фотографии – 2.4 угловых минуты. Даты наблюдений указаны на рисунке.
 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 $F = 0.01$ км⁻² год⁻¹. Оценить угловой размер получившегося протяженного источника. Поле считать однородным по величине и случайным по направлению; рассмотреть случаи $B = 10^{-6}$ Гс и $B = 10^{-9}$ Гс. Потерями на пути между областью магнитного поля и наблюдателем пренебречь.

15. Гамма-кванты достаточно высоких энергий при прохождении через Солнечную систему могут интенсивно рождать 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 $\sim 5 \times 10^{18}$ эВ до $\sim 5 \times 10^{19}$ эВ представляют 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.

Задачи на дом к весеннему семестру

19. Вывести условие гидростатического равновесия для звезды. Вывести из него теорему вириала для звезды. Оценить температуру звезды, зная ее массу и радиус.
20. Показать, что радиус нормальной звезды приблизительно пропорционален ее массе.
21. 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.
22. 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.
23. (★) Пусть гипотетическая псевдоскалярная частица χ массы m_χ взаимодействует с электронами e юкавским образом, то есть лагранжиан взаимодействия $\mathcal{L}_{\text{int}} = Y\chi\bar{e}\gamma_5 e$, 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.
24. (★) Считая электроны тяжелыми по сравнению с аксионами, а среду нерелятивистской и невырожденной, оценить сечение процесса Примакова.

Задачи весеннего семестра

25. 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.
26. Оценить радиус нейтронной звезды массы M .
27. Показать, что магнитное поле одиночной нейтронной звезды препятствует долетанию протонов и ядер сверхвысокой энергии до ее поверхности.
28. 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.
29. Оценить время жизни нейтронной звезды после перехода в режим макроскопической аккреции на попавшую в нее микроскопическую черную дыру.
30. (★) Назовем страннушечкой каплю вырожденного Ферми-газа, состоящего из кварков трех типов u , d , s .
 - (a) Оценить плотность страннушечки.
 - (b) 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.
 - (c) Описать смерть и оценить время жизни нейтронной звезды, поглотившей страннушечку.
 - (d) 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.

- (e) Сравнить полученную в предыдущем пункте вероятность с обратным числом нуклон-нуклонных столкновений за все время работы Большого адронного коллайдера.
31. (★) Вывести и решить уравнение диффузии галактических космических лучей в модели “leaky box”.
32. Сравнить гамма-излучение от Солнца и от центра Галактики, связанное с распадами или аннигиляцией слабовзаимодействующих частиц темной материи. Масса частицы $M = 20$ ГэВ.
33. 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 таких фотонов как функцию аксион-фотонной константы M и ограничить M из того факта, что звезды не являются источниками высокоэнергичного излучения.
34. Оценить параметры (массу и аксион-фотонную константу) аксионоподобной частицы, которая могла бы объяснить наблюдение фотонов с энергиями выше 1 ТэВ от блазара 3C 66A (красное смещение $z = 0.44$).
35. Получить из уравнений Солнца выражение для собственных чисел малых адиабатических колебаний с длиной волны, малой по сравнению с размером Солнца.
36. (★) Показать, что для потоков фотонов Φ_γ и нейтрино Φ_ν с энергией E , рождающихся в распадах π -мезонов, приближенно выполняется соотношение
- $$\int \Phi_\gamma(E) dE = 2 \int \Phi_\nu(E) dE.$$
37. 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?

38. Найти максимальную глубину (в г/см^2) развития адронного каскада широкого атмосферного ливня.
39. Вывести приведенную на лекции формулу, описывающую продольное развитие электромагнитной компоненты широкого атмосферного ливня.