

## Задачи к зачету по курсу “Астрофизика частиц” (май 2011)

### 1. ICS на CMB или SSC?

Рассмотрим сферический сгусток плазмы с нетепловым степенным распределением электронов

$$n_e(\gamma) = k_e \gamma^{-p} H(\gamma; \gamma_1, \gamma_2),$$

где  $k_e$  – нормировочный множитель,  $p$  – параметр (так называемый спектральный индекс),

$$H(\gamma; \gamma_1, \gamma_2) = \begin{cases} 1 & , \quad \gamma_1 \leq \gamma \leq \gamma_2, \\ 0 & , \quad \text{иначе.} \end{cases}$$

Сгусток движется с Доплер-фактором  $\delta_D$ ; события разворачиваются на космологическом красном смещении  $z$ . Магнитное поле в сгустке равно  $B$ .

1. Считая, что в сгустке нет других фотонов, кроме излученных им самим синхротронных и тепловых реликтовых, определить условия (параметры источника), при которых можно пренебречь вкладом в спектр от обратного комптоновского рассеяния (ICS) на реликтовом излучении (CMB) по сравнению с “самокомптоновским” рассеянием на синхротронных фотонах (SSC).
2. В том же приближении оценить параметры излучающей области в блазарах Mrk 421 и 3C 273, воспользовавшись их доступными в интернете спектрами. Сделать аналитическую оценку в  $\delta$ -функциональном приближении и компьютерную оценку с использованием полных формул для синхротронного и комптоновского излучения.

### 2. Красные смещения блазаров.

Блазары с наблюдательной точки зрения представляют собой точечные (за исключением наиболее ярких, разрешенных в радио и рентгеновском диапазонах) источники излучения с существенно нетепловым спектром. В тех случаях, когда в их спектре присутствуют линии, они обладают значительным красным смещением – от  $z \sim 0.1$  и выше, что обычно интерпретируется как указание на то, что эти объекты расположены на космологически больших расстояниях. Данная стандартная интерпретация может встретить следующие возражения.

1. Светимость этих объектов аномально велика (найдите в интернете наблюдаемый спектр квазара 3C 279 и оцените его болометрическую, то есть проинтегрированную по всем энергиям фотонов, светимость, считая расстояние соответствующим космологическому красному смещению).
2. Излучение многих блазаров характеризуется быстрой переменностью, в том числе на масштабе нескольких часов, что указывает на размер области излучения порядка световых часов (оцените размер области излучения и сравните плотность энерговыделения [эрг/с/см<sup>3</sup>] в блазаре и в звезде, где идут ядерные реакции).

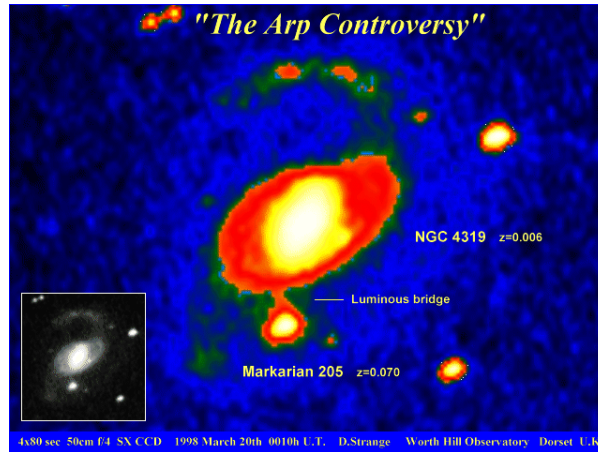


Рис. 1: Пример перемычки, соединяющей объекты с разными красными смещениями.

3. Во многих случаях блазары с большими красными смещениями находятся на небе в непосредственной близости от активных галактик с небольшими красными смещениями, причем несложные статистические тесты показывают, что эти корреляции значимы. Более того, в ряде случаев наблюдаются перемычки, соединяющие объекты с существенно разными красными смещениями (см., напр., рис. 1).
4. В тех случаях, когда удается разрешить отдельные компоненты в изображении блазара, можно наблюдать непосредственно собственное движение компонент на небе. В предположении космологического красного смещения такое поперечное к лучу зрения движение соответствовало бы сверхсветовым скоростям (оцените скорость по рис. 2).
5. В ряде случаев от блазаров регистрируется гамма-излучение в диапазоне ТэВ и выше, которое должно поглощаться на фоновых фотонах. Поправки на поглощение приводят к необходимости привлечения неизвестных механизмов излучения для объяснения слишком жестких спектров в источнике (обсуждавшийся на лекции “IR/TeV кризис”).

Естественное предположение состоит в том, что блазары представляют собой небольшие сгустки плазмы, выброшенные с высокими скоростями близкими активными галактиками, так что их красные смещения доплеровские (такого предположения придерживаются некоторые весьма известные астрофизики). Предложите и проанализируйте количественно аргументы, поддерживающие стандартную гипотезу космологических красных смещений блазаров.

### 3. Ускорение частиц в приграничном слое релятивистского потока.

Пусть релятивистский поток плазмы движется равномерно и прямолинейно во внешней покоящейся такой же плазме; Лоренц-фактор потока  $\Gamma$ ; события разворачиваются в области с магнитным полем  $B$ .

1. По аналогии с ускорением на фронте ударной волны, рассмотренным на лекции, опишите ускорение заряженной частицы, пересекающей время от времени границу потока. Оцените выигрыш в энергии от одного цикла и общий темп ускорения.

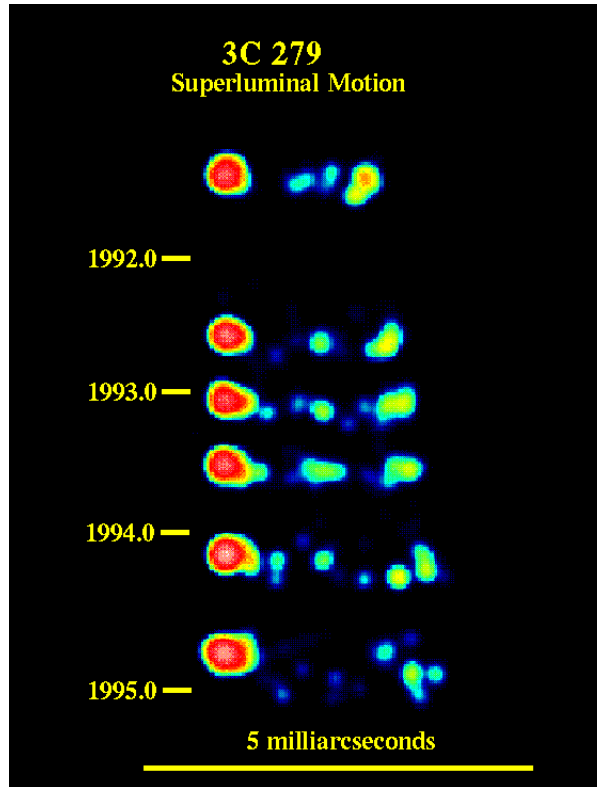


Рис. 2: Сверхсветовое движение в блазаре 3C 279.

2. Пусть речь идет об ускорении релятивистского электрона в области, заполненной излучением, так что становятся возможными процессы обратного комптоновского рассеяния  $e^\pm \gamma_B \rightarrow e^\pm \gamma'$  и рождения пар  $\gamma' \gamma_B \rightarrow e^+ e^-$ , приводящие к развитию электромагнитного каскада. Его можно представить себе как поочередные превращения ускоряемого электрона в фотон и обратно. В бытность свою фотоном частица не ускоряется и не отклоняется полем. Описать, как это влияет на темп ускорения.
3. Пусть теперь плотность фоновых фотонов такова, что время развития одного шага каскада порядка времени одного цикла ускорения. Показать, что этот процесс может делать ускорение значительно более эффективным, и оценить требуемые плотности фотонов. Связав плотность фотонов со светимостью, изучить вопрос о применимости данного механизма к струям блазаров.

#### 4. Обратное комптоновское рассеяние на солнечном свете.

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  $\theta$  вокруг Солнца, для  $\theta = 5^\circ$  и  $\theta = 20^\circ$ ). Считать, что спектр электронов между Солнцем и орбитой Земли везде примерно одинаковый.