

24.06.96.

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

АТОЯН АРМЕН МАНУКОВИЧ

МОДЕЛИ ГЕНЕРАЦИИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ  
В ИСТОЧНИКАХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Специальность:

A.04.02 – Теоретическая физика

A.04.16 – Физика ядра, элементарных  
частиц и космических лучей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

ЕРЕВАН – 1996

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԾԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Աթոյան Արմեն Մանուկի

ՏԻԵՋԱՆԳԱՆ ԸՆՈՍԳԱԾԹՆԵՐԻ ԱՂԵՑՈՒՐՆԵՐՈՒՄ  
ԳԱՍՏԱ ԸՆՈՍԳԱԾԹՄԱՆ ԱՌԱՋԱԾՄԱՆ ՄՈՂԵՂՆԵՐ

Ա. 04. 02 - «տեսական ֆիզիկա», և Ա. 04. 16 - «միջուկի,  
տարրական մասնիկների և տիեզերական ճառագայթների ֆիզիկա»  
մասնագիտություններով

ֆիզիկամաթեմատիկոսի գիտությունների դոկտորի  
գիտական առաջաճանի կարգման առևտրություն

Մ Ն Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ - 1996

Работа выполнена в Ереванском физическом институте

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:**

- доктор физ.-мат. наук, академик НАН РА Д.М. СЕДРАКЯН (ЕГУ)
- доктор физ.-мат. наук, профессор В.А. ДОГЕЛЬ (ФИАН РФ)
- доктор физ.-мат. наук А.А. ЧИЛИНГАРЯН (ЕрФИ)

**ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:** Ереванский государственный университет (кафедра теоретической физики)

Защита состоится 4 июня 1996 г. в 14 часов на заседании Специализированного совета 024 при Ереванском физическом институте (375036, Ереван, ул. Братьев Аликсаниян)

(Диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕрФИ.)

Автореферат разослан 3 мая 1996 г.

Ученый секретарь

Специализированного совета *А. Маргарян* А.Т.Маргарян

**Աշխատանքը պատրաստվել է Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում**

**Պաշտոնական ընդդիմախոսներ.**

- Ֆիզ.մաթ. գիտությունների դոկտոր. Հ.Ա. ԱԿՈՒՆԻՍԻԿԱՆ Դ.Ս. ՍԵԴՐԱԿՅԱՆ (ԵԳՄ)
- Ֆիզ.մաթ. գիտությունների դոկտոր, պրոֆեսոր Վ.Ա. ԴՈԳԵԼ (ՖԻԱՆ, ՌՖ)
- Ֆիզ.մաթ. գիտությունների դոկտոր Ա.Ա. ՉԻԼԻՆԳՈՐՅԱՆ (ԵրՖԻ)

Առաջատար կազմակերպություն. Երևանի պետական համալսարանի տեսական ֆիզիկայի սեփին

Պաշտպանությունը կարգավորվել է 1996թ. հունիսի 4-ին ժամը 14 Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտի (Երևան, Ալիաշանյան եղբայրների փ. 2) 024 մասնագիտական խորհրդում:

Ատենախոսությունը կարգի է ծանոթանալ ԵրՖԻ-ի գրադարանում

Սեղմագիրը առաքված է 1996թ մայիսի 3

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար *Ա.Մարգարյան* Ա.Մարգարյան

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность работы.** Исследование процессов, происходящих в источниках космических лучей (КЛ), галактических и внегалактических ускорителях релятивистских частиц, таких как пульсары, сверхновые, активные галактики и др., имеет большое значение, поскольку как экстремальные физические условия, которые достигаются в этих объектах (плотности энергии электромагнитных и гравитационных полей, тепловой и релятивистской плазмы, и т.д.), так и огромные пространственно-временные масштабы, при которых только и возможно ускорение частиц до сверхвысоких энергий, являются принципиально недостижимыми в лабораторных условиях. Практически единственной возможностью получения непосредственной информации о происходящих в этих объектах процессах является регистрация электрически нейтрального излучения, поскольку регистрация КЛ в окрестности Земли дает лишь косвенную и усредненную по источникам (в основном лишь галактическим) информацию. В этой связи следует отметить большой вклад радиоастрономии, которая дает информацию о синхротронном излучении электронной компоненты непосредственно в источниках КЛ. Однако, наиболее ценную информацию о происходящих в источниках КЛ процессах, вероятно, следует ожидать из области гамма-астрономии, с развитием которой связаны основные надежды на непосредственное зондирование источников КЛ (отметим недавние впечатляющие достижения спутника-обсерватории Compton GRO).

В настоящее время в различных диапазонах электромагнитного излучения накоплен значительный объем экспериментальных данных, прямо либо косвенно свидетельствующих об эффективном ускорении релятивистских частиц в различных галактических и внегалактических объектах. Так, исследования больших выборок ядер активных галактик и квазаров (далее - ЯАГ) выявили существенную корреляцию светимостей этих источников от радио до рентгеновского диапазонов, что свидетельствует не только о едином первоисточнике энергии, но и *нетепловом* (т.е. не связанном с тепловой плазмой) механизме генерации электромагнитного излучения. Прямым свидетельством релятивистских частиц в этих объектах явилось наблюдение мощного  $\gamma$ -излучения в области высоких энергий,  $E_\gamma \geq 100$  МэВ, обнаруженное во второй половине 70-ых годов спутником COS B от квазара 3C 273, и недавно зарегистрированное от целого ряда других квазаров детектором EGRET на спутнике GRO. При этом мощность энерговыделения этих источников в  $\gamma$ -лучах оказывается сравнимой либо даже превосходит суммарную мощность электромагнитного излучения во всех остальных диапазонах, последовательное объяснение чего оказывается достаточно проблематичным.

Интерпретация  $\gamma$ -излучения галактических источников также связана с разрешени-

ем значительных проблем, из которых отметим прежде всего проблему ускорения релятивистских частиц и связанную с этим общую проблему происхождения космических лучей. Сообщения в 80-ых годах о регистрации  $\gamma$ -излучения в области энергий  $\geq 1$  ТэВ ( $1 \text{ ТэВ} \equiv 10^{12} \text{ эВ}$ ) и  $\sim 10^{15} \text{ эВ}$  от таких источников, как рентгеновские двойные Cygnus X-3 и Hercules X-1, непосредственно свидетельствовали о возможности эффективного ускорения КЛ в галактических источниках до сверхвысоких энергий. В дальнейшем, однако, появились существенные сомнения в достоверности этих сигналов, обязанные, в частности, также и трудностям теоретической интерпретации полученных данных. Следует отметить, что некоторые проблемы, такие как проблема источников гамма-всплесков, поставленные гамма-астрономией перед теоретической астрофизикой высоких энергий, представляются в настоящее время просто неразрешимыми. Предлагаемые для интерпретации полученных данных теоретические модели зачастую оказываются в состоянии объяснить лишь ограниченную часть данных, и не учитывают последовательным образом ни возникающие энергетические проблемы, ни возможные "побочные" эффекты (связанные, например, с искажением спектра  $\gamma$ -квантов при их выходе из области генерации наружу).

Очевидно, требуются значительные теоретические исследования для построения целостной картины релятивистских процессов, происходящих в различных источниках космического гамма-излучения. В данной диссертации проведено обобщение работ, выполненных автором в этом направлении.

Основная цель этих работ - качественное и количественное исследование процессов генерации и переноса нетеплового электромагнитного излучения в космических источниках гамма-излучения, и разработка моделей этих объектов, способных объяснить, по возможности наиболее полным образом, имеющиеся наблюдательные данные, а также понять, какую информацию об источниках КЛ можно ожидать от наблюдения гамма-излучения в различных диапазонах, от умеренных до сверхвысоких энергий.

Научная новизна диссертационной работы определяется тем, что большинство исследованных в ней моделей генерации и переноса гамма-излучения были предложены и разработаны впервые в работах автора. Именно:

- исследованы спектральные характеристики частиц, рождающихся при двухфотонной аннигиляции изотропной ( $e^-$ ,  $e^+$ ) плазмы, а также при обратном процессе фоторождения ( $e^-$ ,  $e^+$ ) пар при  $\gamma$ - $\gamma$  столкновениях;
- детально исследованы эффективности и спектральные характеристики различных механизмов генерации  $\gamma$ -излучения в Крабовидной туманности; выдвинута гипотеза о возможности эффективного усиления вклада тормозного излучения релятивистских электронов в Крабовидной туманности в результате проникновения и частичного удержания

релятивистских электронов в областях с повышенной плотностью газа;

- введено понятие, определена система уравнений, и исследованы характеристики электрон-фотонного каскада второго типа (ЭК-2), инициируемого в ядрах активных галактик релятивистскими нейтронами.
- предложен итерационный метод решения системы каскадных уравнений, позволяющий численно исследовать развитие стационарных электромагнитных каскадов в огромных динамических диапазонах по пространственным и энергетическим переменным;
- предложена и исследована модель аккреционного плазменного турбулентного реактора (АПТР) в ЯАГ;
- предложена модель "облако-мишень под пучком релятивистских частиц", и объяснены в рамках этой модели на качественном и количественном уровнях все особенности эпизодического аномально пульсирующего  $\gamma$ -излучения, наблюдаемого от рентгеновских двойных звезд;
- проведены расчеты электрон-фотонного каскада, развивающегося одновременно в веществе, в фотонном поле, в магнитном поле. Исследована эволюция во времени спектров электромагнитного излучения изначально плотного расширяющегося облака на разных стадиях его развития.
- исследована эволюция во времени и модификация спектров космических лучей в окрестности точечного источника в результате зависящего от энергии частиц диффузного пространства в межзвездной среде;
- в рамках предложенного двухкомпонентного подхода к интерпретации спектров электронов в составе КЛ впервые показано, что в области высоких энергий естественно ожидать аномально высокое (по сравнению со вкладом лишь вторичных позитронов) отношение  $e^+/e^- + e^+$ , если зарядовый состав первичных электронов локальной (L-) компоненты отличается от состава G-компоненты.
- детально исследована эволюция во времени спектральных потоков высокоэнергичного гамма-излучения, которые можно ожидать из окрестности дискретных ускорителей КЛ в диапазоне от высоких до сверхвысоких энергий.

Практическая ценность данной диссертационной работы заключается в том, что развитые в ней модели и подходы в состоянии объяснить широкий круг имеющихся наблюдательных данных от различных типов источников КЛ, и могут быть использованы как для дальнейших теоретических разработок и исследований происходящих в них высокоэнергичных процессов, непосредственная и наиболее ценная информация о чем может быть получена именно в диапазоне гамма-излучения, так и для обоснованного выбора наиболее перспективных для наблюдений астрофизических объектов. Так, проведенные исследования различных механизмов генерации  $\gamma$ -излучения Крабовидной

туманности обнаруживают, что в гамма-астрономических данных от этого источника содержится весьма интересная информация о среднем магнитном поле, а также о характере взаимодействий релятивистских электронов и магнитного поля с плотными филаментами ("волоконками") в туманности, ответственными за наблюдаемое линейчатое оптическое излучение. Интерпретация аномальных свойств эпизодического  $\gamma$ -излучения от рентгеновских двойных в рамках модели "облако-мишень под пучком релятивистских частиц", а также вычисленная в рамках этой модели динамика необычно жестких спектров ТэВ-ного  $\gamma$ -излучения (объясняющие на качественном уровне возможную причину исчезновения пульсирующего сигнала из первоначальных наблюдательных данных после их соответствующей обработки), могут явиться достаточным стимулом для возрождения интереса к целенаправленному наблюдению и исследованию этих объектов. Дальнейшее развитие модели "облако-мишень под пучком релятивистских частиц" в применении к другим классам ускорителей КЛ, и связанная с ней разработка теории электромагнитных каскадов, развивающихся в изначально плотной эволюционирующей мишени, могут привести к формированию нового единого подхода к исследованию нестационарных явлений в различных астрофизических объектах с масштабом переменности от долей секунды до сотен и более лет.

#### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Рассчитаны спектральные характеристики и эффективность генерации и поглощения гамма-излучения изотропной среде в процессах фоторождения и аннигиляции ( $e^-$ ,  $e^+$ ) пар, а также неупругих  $p-p$  столкновений в неравновесной аккреционной плазме.
2. Проведено детальное исследование роли различных механизмов генерации гамма-излучения в Крабовидной туманности в рамках предложенной двухкомпонентной модели для релятивистских электронов; выдвинута гипотеза о возможной высокой эффективности тормозного излучения "радио" электронов в области выше 1 ГэВ.
3. Предложена модель ядер активных галактик с инъекцией релятивистских протонов и образованием релятивистских нейтронов в области основного энерговыделения.
4. Дано определение и разработана модель электрон-фотонного каскада второго типа (ЭК-2), инициируемого в ядрах активных галактик релятивистскими нейтронами. Предложен итерационный метод для численного решения системы стационарных каскадных уравнений, позволяющий исследовать развитие электромагнитных каскадов в огромных динамических диапазонах по пространственным и энергетическим переменным.
5. Для ЯАГ предложена модель аккреционного плазменного турбулентного реактора (АПТР) с распределением релятивистских электронов максвелловского типа.
6. Предложена модель "облако-мишень под пучком релятивистских частиц" для рентгеновских двойных звезд; исследована эволюция во времени спектров электромагнитного

излучения изначально плотного расширяющегося облака на разных стадиях его развития; показана возможность использования данного подхода также для интерпретации некоторых особенностей гамма-всплесков высоких энергий.

7. Предложен двухкомпонентный подход к для корректной интерпретации спектров электронов в составе КЛ; показано, что в области высоких энергий естественно ожидать аномально высокое (по сравнению со вкладом лишь вторичных позитронов) отношение  $e^+/e^- + e^+$ , если зарядовый состав первичных электронов локальной (L-) компоненты отличается от состава G-компоненты. Предсказывается высокая вероятность обнаружения нерегулярностей в полном спектре электронов в области  $E \gg 100$  ГэВ.

8. Детально исследована эволюция во времени и корреляции спектральных потоков космических лучей, а также гамма-излучения в диапазоне от высоких до сверхвысоких энергий, которые можно ожидать из окрестности дискретных ускорителей КЛ.

**Публикации.** Представленные в диссертации результаты опубликованы в 30 работах автора, список которых приведен в конце данного автореферата.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на 19-ой, 21-ой, 24-ой Международных конференциях по космическим лучам (Ла Йолла, 1985; Аделаида, 1990; Рим, 1995), на 29-ом Европейском Симпозиуме ESLAB в Нидерландах (Норвайк, 1995), на международном рабочем совещании "Релятивистские адроны в компактных космических объектах" в Польше (Кониинки, 1990), на всесоюзных и республиканских конференциях и совещаниях, на семинарах в ЕрФИ, ЕГУ, ФИАН им.Лебедева, ЛФТИ им.Иоффе, МИФИ, НИЯФ МГУ, и др.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из общего введения, семи Глав и Заключения. Список использованной литературы включает 198 наименований. Диссертация изложена на 130 странице (компьютерный формат 12pt), и включает 26 рисунков.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении поводится краткое обсуждение актуальности проблем, рассмотренных в диссертации, и освещается круг вопросов, изложенных в отдельных главах диссертации.

В первой Главе диссертации посвящена обсуждению ряда основных процессов генерации и поглощения непрерывного *теплого* гамма-излучения (в отличие от линейчатого, в результате различных ядерных переходов в горячей плазме), регистрация которого, особенно в области высоких энергий  $E \geq 100$  MeV, является прямым свидетельством

релятивистских частиц в источнике. Основное внимание уделялось процессам, которые наиболее важны прежде всего в компактных источниках, отличающихся высоким значением отношения светимости  $L_s$  к размеру  $R_s$  источника, и соответственно, высокой плотностью фотонного поля.

К этим процессам прежде всего следует отнести процесс генерации жесткого электромагнитного излучения в результате обратного комптоновского рассеяния (далее ОКР) релятивистских электронов в окружающем поле низкочастотных фотонов. Характерной особенностью этого процесса, детально исследованного многими авторами является то, что возникающие в результате ОКР спектры электромагнитного излучения существенно зависят от параметра  $b = 4\gamma\epsilon_0$ , где  $\gamma$  - Лоренц-фактор электрона, а  $\epsilon_0 \equiv h\nu_0/m_e c^2$  - энергия рассеиваемого фотона (в единицах энергии массы покоя электрона). В Томсоновском режиме, который соответствует  $b \ll 1$ , процесс ОКР является наиболее эффективным, с полным сечением рассеяния  $\sigma_T = (8\pi/3)r_e^2 = 6.65 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$  (Томсоновское сечение;  $r_e$  - классический радиус электрона). Краткое обсуждение процесса ОКР проводится в § 1.1. диссертации.

Важным каналом взаимодействия  $\gamma$ -квантов в компактных астрофизических объектах является их поглощение в процессе фотон-фотонных столкновений с образованием электрон-позитронных пар:  $\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$ . В § 1.2 приводятся результаты аналитических вычислений и анализ спектров ( $e^-, e^+$ ) пар, рождающихся при поглощении  $\gamma$ -в изотропном поле низкочастотных фотонов.

Далее в § 1.3 исследуется процесс двухфотонной аннигиляции ( $e^-, e^+$ ) пар. В частности, показано, что  $\approx 10 - 20\%$  релятивистских позитронов может аннигилировать "на лету" (вне областей ускорения), основная же часть позитронов может аннигилировать только после термализации в окружающей среде. Важным астрофизическим приложением этого эффекта является то, что из сравнения интенсивностей непрерывного  $\gamma$ -излучения и узкой аннигиляционной линии 0.511, наблюдаемых в направлении центра Галактики, следует, что характерная энергия инжекции позитронов в межзвездную среду не превосходит  $\sim 10 \text{ МэВ}$ , что позволяет существенно ограничить круг моделей источников этих позитронов, и в частности, исключить из рассмотрения модели, предполагающие в качестве источника позитронов пульсары в центре Галактики.

В § 1.3 обсуждается также излучение оптически тонкой ( $e^-, e^+$ ) плазмы. В частности, получено удобное аналитическое выражение для спектрального коэффициента аннигиляционного излучения  $q(\epsilon)$  (т.е. интенсивности излучения в единице объема, в  $4\pi$ ) тепловой ( $e^-, e^+$ ) плазмы с произвольной температурой  $\Theta \equiv kT_e/m_e c^2$  электронов. Это выражение корректно описывает эффект "голубого смещения" аннигиляционной линии 0.511 МэВ, согласно которому максимум аннигиляционного излучения тепловой ( $e^-, e^+$ ) плазмы соответствует энергии  $\epsilon_{\text{max}} = 1 + a\Theta$  с  $a = 3/4$  (в единицах массы покоя электрона).

В источниках с достаточно высокой плотностью вещества эффективным каналом генерации непрерывного  $\gamma$ -излучения могут быть неупругие взаимодействия высокоэнергичных протонов с образованием и распадом  $\pi^0$ -мезонов:  $p + p \rightarrow X + \pi^0 \rightarrow X + 2\gamma$ . Для рождения пионов в этой реакции требуется кинетическая энергия протонов  $\geq 150 \text{ МэВ}$ . Предполагалось, что этот механизм генерации  $\gamma$ -излучения может быть эффективным для плазмы, нагретой при аккреции на нейтронную звезду или черную дыру до температур  $kT \sim 10 \text{ МэВ}$ . В § 1.4 рассмотрена проблема установления равновесного (максвелловского) распределения частиц в первоначально неравновесной нерелятивистской плазме. Найдено аналитическое решение уравнения, описывающего эволюцию во времени высокоэнергичной ( $E \gg kT$ ) части функции распределения частиц, из которого следует, что время  $\tau_E$  установления максвелловского распределения в области  $E \gg kT$  значительно превышает время  $t_0$  установления теплового равновесия в области характерных энергий  $E \sim kT$ :  $\tau_E \approx t_0(E/kT)^{3/2}$ . Использование этого выражения, в частности, для аккреционной плазмы позволяет сделать вывод о том, что генерация гамма-излучения в тепловой плазме при аккреции на нейтронную звезду или предполагаемую черную дыру является значительно менее эффективным процессом, чем предполагалось ранее.

Глава 2 диссертации посвящена детальному исследованию различных механизмов генерации  $\gamma$ -излучения в Крабовидной туманности. Этот источник, с характерным размером  $r_0 \approx 2 \text{ пк}$ , на расстоянии  $d \approx 2 \text{ кпк}$ , является одним из наиболее изученных объектов в нашей Галактике, и вероятно, наилучшей космической лабораторией для исследования релятивистских процессов в источниках КЛ. Ускорение на фронте ударной волны, отстоящей от пульсара Краба на расстоянии  $r_s \approx 0.1 \text{ пк}$ , может в принципе привести к максимальным энергиям электронов  $\sim 3 \times 10^{15} \text{ эВ}$ , что достаточно для интерпретации наблюдаемого  $\gamma$ -излучения вплоть до  $E_\gamma \leq 1 \text{ ГэВ}$  как синхротронного излучения. В области же более высоких энергий наблюдаемое  $\gamma$ -излучение обычно приписывается одному лишь процессу ОКР.

Распределения яркости в радио - оптическом диапазонах указывают, что в центральной  $r \leq 0.5 \text{ пк}$  области Краба магнитное поле  $B(r)$  возрастает. Такое поведение поля естественным образом объясняется в рамках магнитогидродинамической (МГД) модели распространения электронов в туманности, которая используется (в § 2.2) для вычисления пространственного распределения высокоэнергичных электронов, инжектируемых в туманность на фронте стоячей ударной волны. Показано, что следует различать две популяции релятивистских электронов в Крабовидной туманности, именно: (а) электроны очень высоких и сверхвысоких энергий, инжектируемые в туманность в настоящее время; и (б) электроны с энергиями  $E \leq 100 \text{ ГэВ}$ , ответственные за синхротронное излучение от радио до инфракрасного (ИК) диапазона, которые являются "реликтовыми"

для Краба, и вероятно, отражают историю эволюции Крабовидной туманности. В рамках такой двухкомпонентной модели возможно обеспечить хорошее согласие спектров синхротронного излучения с наблюдательными данными в широкой области частот от  $10^7$  до  $\sim 2 \times 10^{23}$  Гц ( $\sim 1$  ГэВ).

Генерация гамма-излучения более высоких энергий обычно связывалась лишь с процессом ОКР релятивистских электронов в поле синхротронного излучения, а также в поле теплового ИК излучения пыли в туманности, и в поле реликтового микроволнового излучения 2.7 К. Проведенный в § 2.3 анализ показывает, что форма спектров ОКР излучения туманности оказывается очень устойчивой относительно изменения модельных параметров в пределах, допустимых для объяснения наблюдаемого спектра синхротронного излучения. Это связано с почти однозначной зависимостью формы спектров электронов в туманности от формы спектра наблюдаемого синхротронного излучения.

Комптоновское излучение в области ГэВ-ных энергий генерируется "радио" электронами, которые ответственны за синхротронное излучение в субмиллиметровом-ИК диапазоне с показателем дифференциального потока  $\delta_r \approx 1.3$ . Излучение же ТэВ-ных энергий генерируется электронами, ответственными за мягкое рентгеновское излучение Крабовидной туманности со спектральным индексом  $\delta_x \approx 2.1$ . В этих условиях абсолютные значения потоков ОКР излучения зависят практически лишь от величины среднего поля  $B_0$  в Крабовидной туманности. В частности:

$$F_\gamma(1 - 10 \text{ GeV}) \approx 10^{-8} \left( \frac{B_0}{3 \times 10^{-4} \text{ G}} \right)^{-1.3} \left( \frac{\theta_{\text{CN}}}{3'} \right)^{-2} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}, \quad (1)$$

$$F_\gamma(> 1 \text{ TeV}) \approx 9 \times 10^{-12} \left( \frac{B_0}{3 \times 10^{-4} \text{ G}} \right)^{-2.1} \left( \frac{\theta_{\text{CN}}}{3'} \right)^{-2} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}, \quad (2)$$

где  $\theta_{\text{CN}} \approx 3'$  - характерный угловой размер туманности. В поле  $B_0 \approx 3 \times 10^{-4}$  Гс, соответствующему условию равномерного распределения энергий магнитного поля и релятивистских электронов, поток ТэВ-ного комптоновского излучения согласуется с результатами наблюдений Whipple других групп. Однако, поток  $\gamma$ -излучения в области (1-10) ГэВ оказывается существенно (на фактор 4-5) ниже результатов наблюдений EGRET.

Если наблюдаемое EGRET в области  $\geq$  ГэВ излучение генерируется в самой туманности (а не является непulsирующей компонентой излучения непосредственно пульсара), то остается предположить, что оно обязано релятивистским частицам, взаимодействующим с окружающим газом. Тогда естественным механизмом можно было бы считать тормозное излучение "радио" электронов. Однако, средняя плотность газа в туманности,  $\bar{n} \sim 5 \text{ см}^{-3}$  может обеспечить не более 10% потока EGRET.

В действительности, в Крабовидной туманности газ сосредоточен преимущественно в тонких волокнах филаментах ("волокнах"), ответственных за наблюдаемое в

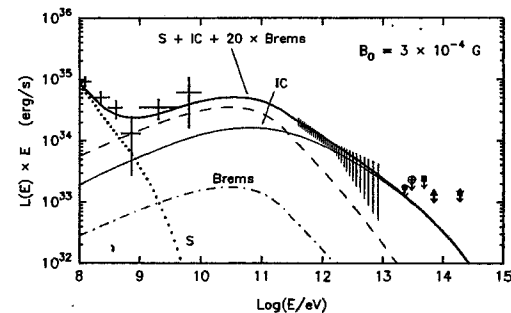


Рис. 1: Полный спектр высокоэнергичного гамма-излучения Крабовидной туманности (жирная сплошная линия), в предположении эффективной плотности газа  $n_{\text{eff}} = 100 \text{ см}^{-3}$  для тормозного излучения (штрихованная линия). Спектр тормозного излучения, соответствующий средней плотности газа  $\bar{n} = 5 \text{ см}^{-3}$ , показан штрих-пунктирной линией.

оптическом-ИК диапазоне линейчатое излучение, где плотность газа  $n_f \sim 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Как показано в § 2.4 диссертации, эффективная плотность газа  $n_{\text{eff}}$ , которую "видят" релятивистские частицы в сильно неоднородной среде, может быть значительно выше средней  $\bar{n}$ , если в областях с повышенной плотностью их средняя скорость распространения меньше.

На рис.1 жирной линией приведен суммарный спектр  $\gamma$ -квантов в результате синхротронного ("S"), обратного Комптоновского ("IC") и тормозного излучений в случае  $n_{\text{eff}} = 20 \times \bar{n} = 100 \text{ см}^{-3}$  (штрихованная линия). Хорошее согласие с имеющимися в настоящее время экспериментальными данными очевидно. Заметим, что в области выше 1 ТэВ поток  $\gamma$ -квантов обязан лишь ОКР, поэтому определение интегрального потока  $F(> 1 \text{ TeV})$  даст возможность практически модельно-независимого определения поля  $B_0$ . Тестом для подтверждения Комптоновской природы излучения в области (1-10) ТэВ могут быть измерения спектров Краба с показателем степени  $\alpha_\gamma \approx 2.6 - 2.7$ . В области же (0.1-1) ТэВ вклад "усиленного" тормозного излучения является существенным, приводя к суммарным спектрам значительно более крутым (также с  $\alpha_\gamma \approx 2.6 - 2.7$ ), чем чисто ОКР спектры (с  $\alpha_\gamma \approx 2.2 - 2.4$ ).

В Главе 3 исследуется модель для ядер активных галактик, в рамках которой возможно ожидать генерацию и выход из этих мощных внегалактических ускорителей релятивистских частиц наблюдаемых потоков  $\gamma$ -квантов высоких и очень высоких энергий.

Во вводной части Главы 3 (§ 3.1), одна из значительных проблем, связанных с возможностью эффективной генерации  $\gamma$ -излучения, заключается в том, что первоисточ-

ник энергии излучения ЯАГ скорее всего находится в центральной области с размерами  $R_0 \leq 10^{15} - 10^{16}$  см. В то же время,  $\gamma$ -кванты высоких энергий,  $E_\gamma \geq 100$  МэВ, не могут выходить из этой области из-за их поглощения в оптически плотном поле рентгеновских фотонов. В таких источниках выходящее  $\gamma$ -излучение может формироваться лишь после выноса соответствующей энергии на расстояния  $\geq 10 \times R_0$ . Перенос энергии на значительно большие расстояния необходим для объяснения потоков ТэВ-ных  $\gamma$ -квантов, поскольку для выхода последних из ЯАГ они должны генерироваться на значительном удалении от области формирования ИК-оптического излучения с характерными размерами  $\sim 0.1 - 1$  пк.

В §3.2 для решения проблемы выноса энергии на периферию ЯАГ предлагается модель, предполагающая эффективное ускорение релятивистских протонов в области основного энерговыделения  $r_0 \equiv R_0/R_g \leq 10$  (в единицах гравитационного радиуса  $R_g = 2GM/c^2 \sim 3 \times 10^{12} - 3 \times 10^{14}$  см для предполагаемой массивной черной дыры с  $M \sim 10^7 - 10^9 M_\odot$ ). В этих условиях, в результате неупругих взаимодействий РП с окружающей средой, является неизбежным интенсивное образование релятивистских нейтронов (РН), которые уже (в отличие от РП) не удерживаются магнитными полями, и могут выходить из области ускорения, осуществляя тем самым вынос энергии (после распада  $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$ ) из области основного энерговыделения на периферию ЯАГ. Характерно, что время распада нейтрона в системе покоя  $\tau_0 \approx 900$  сек соответствует длине  $l_0 = c\tau_0 \sim 3 \times 10^{13}$  см, т.е. гравитационному радиусу черной дыры (ЧД) с массой  $M = 10^8 M_\odot$ , а для РН с Лоренц-фактором  $\Gamma$  средняя длина пробега до распада составляет  $l_n = \Gamma \times l_0$ , т.е. происходит в масштабах ЯАГ.

Найдено решение транспортного уравнения РН и функция генерации вторичных РП в области  $r \geq r_0$  с учетом процессов неупругих взаимодействий и распада нейтронов. В области  $r \gg r_0$  функция генерации имеет вид:

$$q_p(r, \Gamma) \propto \Gamma^{-(\alpha_p+1)} r^{-2} \exp\left(-\frac{\Gamma_d}{\Gamma}\right), \quad (3)$$

где  $\Gamma_d \equiv \Gamma_d(r) = 1.1 M_8 r$ .

Показано, что таким образом на периферию ЯАГ может выноситься до 1/3 мощности  $\dot{W}_p \sim 0.1 \dot{M} c^2$ , инжектируемой в ускоренные РП в области основного энерговыделения ( $\dot{M}$  - темп аккреции). Выделение на большом удалении от центральной массы  $M$  столь больших мощностей в форме релятивистских протонов, взаимодействующих через магнитные поля с аккреционной плазмой, может иметь существенное влияние на поведение последней, в частности, может привести к блокировке аккреции на некотором расстоянии  $r_{ст}$ . Поэтому для самосогласованности стационарной модели должно происходить достаточно быстрое охлаждение РП, в частности, в процессе неупругих  $p-p$  взаимодействий.

Половина энергии, переносимой РН, передается образующимся нейтрино и беспрепятственно выносится из ЯАГ. Остальная же часть этой энергии передается вторичным (после распада пионов) гамма-квантам и релятивистским электронам, и приводит к развитию в ЯАГ электромагнитного (т.е. электрон-фотонного) каскада (далее, ЭК).

В компактных источниках, характеризующихся так называемым параметром компактности

$$l \equiv \frac{L_s \sigma_T}{4\pi R_s m_e c^3} \gg 1, \quad (4)$$

к числу которых относятся и ЯАГ, плотность поля "мягкого" излучения ( $\epsilon_0 \ll 1$ ) очень высока, так что спектры выходящих из таких источников  $\gamma$ -квантов высоких энергий формируются в результате ЭК. Качественно этот процесс описывается следующим образом. Гамма-квант с энергией  $\epsilon$ , поглощаясь в поле мягких фотонов с  $\epsilon_0 \geq 1/\epsilon$ , образует два электрона ( $e^+$  и  $e^-$ ) с энергиями  $\gamma \sim \epsilon/2$ . Последние в процессе ОКР на тех же фотонах могут рождать  $\gamma$ -кванты нового поколения с энергиями вплоть до  $\epsilon' \approx \gamma$ . Такое дробление энергии начальных  $\gamma$ -квантов будет происходить до тех пор, пока каскадные  $\gamma$ -кванты не попадут в область энергий, соответствующих оптической прозрачности источника.

Детальное исследование развития ЭК в компактных астрофизических источниках проводилось в многими авторами. Практически во всех из них, однако, рассматривался ЭК, инициированный  $\gamma$ -квантами либо релятивистскими электронами в пространственно однородном поле фотонов (далее, ЭК-1). Каскад, инициированный в ЯАГ результате распространения нейтронов, носит качественно иной характер.

Понятие электромагнитного каскада второго рода, ЭК-2, введено в §3.3. Принципиальное отличие ЭК-2 от ЭК-1 заключается в *совокупности двух факторов*, именно: (1) характерная энергия начальных  $\gamma$ -квантов и электронов, инжектируемых на расстояниях  $\sim r$ , линейно возрастает с увеличением  $r$ ; и (2) ЭК-2 развивается в пространственно неоднородном поле фотонов с плотностью, убывающей  $\propto r^{-2}$  при  $r > r_s$  (т.е. вне области формирования мягкого излучения).

В §3.3 определена система стационарных уравнений, описывающих развитие ЭК-2. Функция генерации электронов определяется интегральным уравнением с ядром, вычисляемым для заданного поля низкочастотного излучения ЯАГ. В свою очередь, функция генерации каскадных  $\gamma$ -квантов  $q_\gamma(r, \epsilon)$  определяется локальной плотностью электронов (быстро изотропизирующихся в окружающих магнитных полях), а также суммой различных процессов генерации высокоэнергичных  $\gamma$ -квантов. Система каскадных уравнений замыкается транспортными уравнениями, связывающими спектральную плотность распределения электронов  $n_e(r, \gamma)$  и гамма-квантов  $n_\gamma(r, \epsilon)$  с соответствующими функциями генерации  $q_e(r, \gamma)$  и  $q_\gamma(r, \epsilon)$ .

Для решения системы *стационарных* уравнений ЭК-2 предложен метод, основанный на представлении полных функций  $n_e, n_\gamma, q_e, q_\gamma$  в виде суммы каскадных электронов и  $\gamma$ -квантов различных поколений  $i \geq 1$ . Указанный подход позволяет вычислить соответствующие распределения каскадных электронов и  $\gamma$ -квантов всех поколений по цепочке

$$q_e^{(i)} \rightarrow n_e^{(i)} \rightarrow q_\gamma^{(i+1)} \rightarrow n_\gamma^{(i+1)} \rightarrow q_e^{(i+1)} \rightarrow \dots \quad (5)$$

При численных расчетах используется *логарифмически* равномерное разбиение осей переменных (т.е. сетка с  $x_{j+1}/x_j = \text{const} \sim 1.1 - 1.3$ ), что позволяет достаточно малым числом точек охватить огромный динамический диапазон по шкалам  $r, \gamma, \epsilon, \epsilon_0$ .

В § 3.4 получены аналитические решения для уравнения переноса излучения в случае произвольных функций генерации и поглощения в сферическом источнике, а также интегрального кинетического уравнения для релятивистских электронов в общем случае произвольных (т.е. возможно и катастрофических) энергетических потерь. Эти решения используются при численных расчетах системы уравнений ЭК-2.

Далее в § 3.5 диссертации проводится качественное и количественное исследование основных характеристик ЭК-2. Основным параметром, характеризующим "стандартный" электромагнитный каскад, развивающийся в пространственно однородном фотонном поле, ЭК-1, является параметр компактности источника  $l \propto L_s/R_s$ . При  $l \gg 1$  формируется универсальный спектр выходящего  $\gamma$ -излучения, практически не зависящий от спектра инжектируемых электронов и/или высокоэнергичных  $\gamma$ -квантов, с экспоненциальным укрупнением выше некоторой энергии  $\epsilon_{th}$ , при которой источник становится оптически толстым для  $\gamma$ -квантов,  $\tau_{\gamma\gamma}(\epsilon > \epsilon_{th}) > 1$ .

Однако, для ЭК-2 обычное определение компактности не информативно, поскольку спектр выходящего излучения различных энергий формируется в разных масштабах по  $r$ . Средняя энергия начальных  $\gamma$ -квантов (и электронов), генерируемых РП, и непосредственно иницирующих ЭК-2, линейно возрастает с увеличением  $r$ . Оптическая толщина источника для этих  $\gamma$ -квантов оказывается равной:

$$\tau_{\gamma\gamma}^{(0)} = L_s/L_{cr}, \quad (6)$$

где критическая светимость  $L_{cr} \approx 1.5 \times 10^{43}$  эрг/с. Таким образом, для ЭК-2, для которого невозможно выделить определенный размер области формирования  $\gamma$ -спектров (фактически, пространственные масштабы задаются длиной пробега нейтронов, а не физическими размерами ЯАГ), "компактность" источника определяется лишь абсолютным значением  $L_s$  ее интегральной светимости от субмиллиметрового до мягкого гамма диапазонов.

Спектры ЭК-2 отличаются отсутствием в них экспоненциального обрезания, характерного для спектров ЭК-1. В области энергий 0.1-10 ГэВ спектр ЭК-2 хорошо аппрокси-

мируется степенным спектром  $L(E_\gamma) \propto E_\gamma^{-\alpha_\gamma}$  с показателем  $\alpha_\gamma = \alpha_r - 1 + \delta$ , где поправка  $0 \leq \delta \leq 0.1$ , а далее постепенно укрупняются, в зависимости от  $L_s$ . Сделан вывод, что для гамма-наблюдений в области очень высоких энергий более перспективными являются относительно близкие ЯАГ с умеренной светимостью,  $L_s \leq 10^{45}$  эрг/с, чем далекие и мощные ЯАГ, такие, как квазары.

Другая проблема, затрудняющая регистрацию ТэВ-ного излучения от далеких ЯАГ, связана с поглощением высокоэнергичного излучения в межгалактической среде. Этот вопрос рассмотрен в § 3.6.

В следующей Главе 4 диссертации рассмотрена модель аккреционного плазменного турбулентного реактора (АПТР), в рамках которой оказывается возможным интерпретировать характерные особенности спектров нетеплового электромагнитного излучения ЯАГ от радио-субмиллиметрового (РСМ) диапазона до области мягкого гамма-излучения.

Характерной особенностью так называемых компактных радиоисточников (КРИ), к которым относятся ЯАГ, является плоская ( $\alpha_r \sim 0$ ) либо инвертированная ( $\alpha_r < 0$ ) форма их спектров ( $L_\nu \propto \nu^{-\alpha_r}$ ) в радио-субмиллиметровом диапазоне. В то же время, в рентгеновском - мягком гамма диапазоне спектры ЯАГ являются достаточно жесткими, с характерным  $\alpha_\gamma \simeq (0.6 - 0.8)$ . Излучение ЯАГ в рентгеновском диапазоне сильно коррелирует с РСМ излучением, что свидетельствует в пользу нетепловых синхро-комптоновских моделей. Однако, как синхротронное, так и комптоновское излучение релятивистских электронов со "стандартным" степенным распределением приводит к одному и тому же показателю степени  $\alpha_\gamma = (\alpha_e - 1)/2$ . Кроме того, простое предположение о наличии релятивистских электронов для ЯАГ представляется недостаточным, поскольку характерные времена радиационных потерь электронов в них существенно меньше минимально возможного времени их распространения в источнике  $R/c$ , что свидетельствует о непрерывной инжекции/ускорении электронов по всему объему источника.

В этой связи представляется привлекательной идея непрерывного ускорения релятивистских электронов в плазме с развитой турбулентностью, использованная ранее в модели плазменного турбулентного реактора (ПТР), предполагающая формирование степенных спектров релятивистских электронов. В § 4.2 показано, что в действительности степенные спектры электронов в моделях ПТР *не являются устойчивыми*, и что при стохастическом ускорении электронов в плазме с развитой турбулентностью формируются спектры типа релятивистского Максвелловского распределения:  $f(\gamma) \propto \gamma^2 \exp(-\gamma/\gamma_0)$ .

В § 4.3 предложена *пространственно неоднородная* модель аккреционного плазменного турбулентного реактора (АПТР), формируемого при сферически симметричной аккреции плазмы с достаточным уровнем турбулентности в ЯАГ. Поскольку характерные

времена энергетических потерь релятивистских электронов очень малы по сравнению с временами их выхода из масштабов  $r$ , спектры электронов  $f(r, \gamma)$  определяются лишь локальными процессами их ускорения и охлаждения. Поэтому как и ранее, возникают спектры типа релятивистского Максвелловского распределения. Однако, отличительной чертой модели АПТР является то, что средняя энергия электронов теперь является зависящей от расстояния  $r$ , и в общем случае приводится к виду:

$$\gamma_0(r) = \gamma_* \times r^\lambda, \quad (7)$$

где  $\gamma_* \leq 100$ , и  $\lambda \sim (0.3 - 0.6)$ .

Вычисления электромагнитного излучения в рамках модели АПТР (§ 4.4) показывают, что как и следовало ожидать, в области РСМ формируются плоские либо инвертированные спектры (по энергии) синхротронного излучения, экспоненциально укручающиеся в области ИК/оптических частот. Распределение синхро-комптоновского излучения в каждой точке  $r$  также является плоской функцией, простирающейся до некоторой частоты  $\nu_x(r)$ , которая, однако, *возрастает* с увеличением  $r$ . В результате, после интегрирования по объему источника, степенная зависимость  $\gamma_0$  от  $r$  приводит к формированию степенной спектральной светимости АПТР,  $L_x \propto \nu^{-\alpha_x}$ , в диапазоне от УФ/рентгеновского до мягкого  $\gamma$ -излучения показателем степени

$$\alpha_x = \frac{2\lambda - 0.025}{4\lambda - 0.75}. \quad (8)$$

Учитывая, что  $0.3 \leq \lambda \leq 0.6$ , получаем, что показатель степени  $\alpha_x \simeq (0.6 - 0.8)$ , т.е. находится в хорошем согласии с наблюдаемым спектром рентгеновского излучения ЯАГ.

В главах 2-4 рассматривались стационарные модели источников  $\gamma$ -излучения. Однако, значительная часть (если не большинство) этих источников должна быть, скорее всего, отнесена к категории переменных, с очень большим диапазоном масштабов переменности, начиная от долей секунды и выше. Более того, многие из них могут быть вообще лишь эпизодическими источниками космического  $\gamma$ -излучения. В последующих 3-х главах диссертации рассмотрены модели нестационарных источников.

В Главе 5 исследована модель "облако-мишень под пучком релятивистских частиц" для интерпретации эпизодического  $\gamma$ -излучения от ряда рентгеновских двойных звезд, таких как Hercules X-1, Vela X-1, и др. Заметим, что в настоящее время отношение к достоверности этих эпизодических сигналов является неоднозначным, и многими ставится под сомнение. Одна из причин скептического отношения связана с экстраординарными характеристиками этого излучения, которые являются достаточно общими для различных источников, и наиболее полно проявляются на примере Hercules X-1. Именно (§5.1):

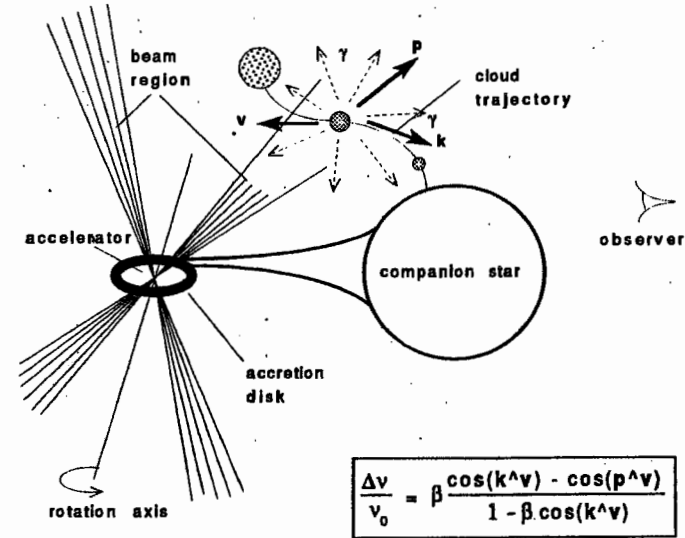


Рис. 2: Сценарий генерации эпизодического гамма-излучения в модели "движущаяся мишень пересекает пучок релятивистских частиц" для рентгеновских двойных.

(а) эпизодический характер  $\gamma$ -излучения, с длительностью отдельных эпизодов  $\Delta t \leq 1$  час; (б) аномальный характер пульсирующего  $\gamma$ -излучения, с нерегулярным сдвигом частоты  $\gamma$ -пульсаций  $\Delta\nu \equiv \nu_\gamma - \nu_0$  относительно частоты  $\nu_0$  рентгеновских пульсаций; (в) отсутствие корреляций с орбитальной фазой  $\phi$  двойной системы. Более того, для затменных систем сообщалось о наблюдениях  $\gamma$ -эпизодов также и в фазе глубокого затмения рентгеновского пульсара.

В §5.2 предложен сценарий модели (рис.2). Основным модельным предположением является то, что из нормальной звезды-компаньона рентгеновской двойной спонтанно выбрасываются сгустки вещества (облака газа) с массой  $M_d \leq 10^{23}$ , которые, в зависимости от их траектории, могут пересекать область, в которой распространяются частицы, непрерывно ускоряемые пульсаром. Под воздействием мощного пучка облако нагревается до температур  $\leq 10^5$  K и расширяется, что приводит к быстрой эволюции его параметров. На стадии, когда облако становится прозрачным по поглощению  $\gamma$ -квантов, оно становится источником пульсирующего  $\gamma$ -излучения. Частота пульсаций аномальна из-за двойного Доплер-эффекта (отражение пульсирующего сигнала от подвижной мишени). Характерный масштаб длительности излучения определяется как временем эволюции параметров расширяющейся мишени, так и временем пересечения

мишенью области распространения пучка КЛ.

Неизбежным следствием модели является предсказание появления аномально пульсирующего теплового (чернотельного) излучения облака в оптическом-ультрафиолетовом (УФ) диапазоне одновременно с  $\gamma$ -пульсациями. Заметим, что феномен аномально пульсирующего эпизодического излучения от двойной Her X-1/HZ Her (и других тесных двойных) в оптическом диапазоне хорошо установлен и наблюдался неоднократно.

В § 5.3 описаны метод расчета и процессы взаимодействия, учитываемые при вычислениях спектров электромагнитного излучения облака, формируемого в результате развития в облаке электромагнитного каскада в обычных условиях, когда на разных стадиях динамичной мишени оказывается необходимым учитывать как процессы взаимодействия в газе, так и в фотонном и магнитном полях в облаке. Далее в § 5.4 приводятся результаты конкретных численных расчетов обсуждение спектров электромагнитного излучения на примере источников Her X-1 и AE Aquarii (катаклизмическая переменная). В рамках предложенной модели на качественном и количественном уровнях объясняются все характерные особенности эпизодического  $\gamma$ -излучения от этих объектов, включая наблюдаемые от AE Aquarii радиовспышки, а также удвоение частоты  $\gamma$ -пульсаций (по сравнению с частотой вращения пульсара).

В рамках модели "движущаяся мишень под пучком релятивистских частиц" можно ожидать очень разные масштабы переменности излучения (в зависимости от размеров системы, массы мишени, скорости ее движения, расстояния до ускорителя, и ее мощности), что делает интересной возможность ее дальнейшего применения для интерпретации переменного  $\gamma$ -излучения различных галактических и внегалактических ускорителей КЛ. В частности, возможность получения очень коротких масштабов переменности позволяет в принципе привлечь эту модель для интерпретации таких явлений, как гамма-всплески. Не претендуя на полную интерпретацию всех загадок этого явления, в § 5.5 обсуждается возможность привлечения этой модели для объяснения некоторых особенностей гамма-всплесков, таких как быстрый рост и более медленный спад интенсивности всплеска, или явление более длительного  $\gamma$ -излучения в области высоких энергий (по сравнению с излучением в области мягкого  $\gamma$ -излучения) в одной и той же вспышке (наблюдаемых, в частности, EGRET).

В Главе 6 исследована проблема эволюции во времени и пространстве спектров КЛ в окрестности отдельного (точечного) ускорителя. Как отмечено во вступительной части Главы 6 (§ 6.1), исследование спектров КЛ в окрестности точечного источника в межзвездной среде представляется актуальной прежде всего для интерпретации наблюдаемых спектров релятивистских электронов. Действительно, регистрация электронов КЛ с энергией вплоть до  $\approx 2$  ТэВ, время охлаждения которых в межзвездной среде  $\sim 10^5$  лет, означа-

ет, с учетом характерного коэффициента диффузии  $D \sim 10^{28}$  см<sup>2</sup>/с, что их источник находится на расстоянии не более нескольких сот парсек.

В § 6.2 приводится решение уравнения диффузии релятивистских для произвольного спектра  $\Delta N(\gamma)$  электронов, инжектированных в однородную межзвездную среду, в общем случае произвольных энергетических потерь  $P(\gamma)$ , и для зависящего от энергии  $\gamma$  (Лоренц-фактор) коэффициента диффузии  $D(\gamma)$ :

$$f(R, t, \gamma) = \frac{\Delta N(\gamma_t) P(\gamma_t)}{\pi^{3/2} P(\gamma) R_{\text{диф}}^3} \exp\left(-\frac{R^2}{R_{\text{диф}}^2}\right) \quad (9)$$

Здесь  $\gamma_t$  соответствует начальной (в момент времени  $t_0 = 0$ ) энергии частиц, которые в момент времени  $t$  охлаждаются до энергии  $\gamma$ , а  $R_{\text{диф}} \equiv R_{\text{диф}}(\gamma, t) \rightarrow 2\sqrt{Dt}$  — эффективный радиус диффузии.

На основании этого выражения, предполагая степенную форму спектра инжекции электронов с показателем  $\alpha$ , в § 6.2 проводится детальный анализ модификации доходящих до наблюдателя нестационарных спектров частиц в процессе их диффузного распространения от точечного источника. В отличие от предыдущих исследований данной проблемы, принципиальным является учет энергетической зависимости коэффициента диффузии:  $D(\gamma) = D_0(1 + \gamma/\gamma_*)^\delta$ .

Действительно, в случае  $\delta = 0$  эффективный радиус диффузии не зависит от энергии, и поэтому спектры электронов с  $\gamma \leq \gamma_{\text{cut}}$  в точке  $R$  лишь повторяют спектр инжекции электронов (рассматриваются времена, заметно меньшие времен охлаждения). Однако, в случае  $\delta > 0$  (скорее всего,  $\delta \sim (0.5 - 0.6)$ ) картина принципиально иная. В частности, в случае "мгновенного" характера инжектора, в области высоких энергий будут наблюдаться степенные спектры КЛ с показателем  $\alpha' = \alpha + (3/2)\delta$  (в случае стационарного источника  $\alpha' = \alpha + \delta$ ).

Такое укрупнение спектра электронов оказывается принципиальным в рамках рассмотренной в § 6.3 двухкомпонентного подхода для корректной интерпретации наблюдаемого в окрестности Земли спектра электронов, которая в области  $E \gg 10$  ГэВ описывается показателем  $\alpha_{\text{obs}} = (3.1 - 3.3)$ . Двухкомпонентная модель для первичных электронов в составе КЛ состоит в том, что:

- (а) вклад источников на больших расстояниях,  $R \geq 1$  кпк, обозначаемый G-компонентой, вычисляется в рамках стандартной гипотезы о непрерывном распределении источников в пространстве и во времени;
- (б) вклад от одного или нескольких близких и относительно молодых источников, называемый L-компонентой, и ответственных, в частности, за наблюдаемый поток ТэВ-ных электронов, вычисляется отдельно как от точечных источников.

В случае импульсивного источника в области энергий, соответствующих условию

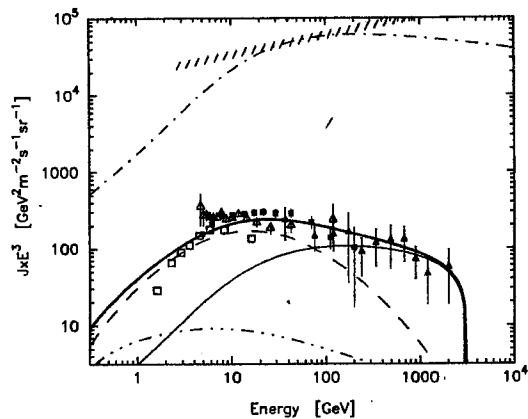


Рис. 3: Спектральные потоки электронов L-, G-, и S- компонент, показанные соответственно сплошной, штрихованной, и штрих-пунктирной линиями. Суммарный спектр показан жирной сплошной линией. Расстояние до локального "импульсивного" источника  $R = 100$  пк, возраст  $t = 10^5$  лет.

$R_{\text{diff}}(E, t) \gg R$ , первичный степенной спектр электронов с показателем  $\alpha$  укручается на величину  $(3/2)\delta$ . Для характерного  $\delta \sim 0.5 - 0.6$  это соответствует тому, что спектр L-компоненты электронов будет в согласии с наблюдаемым спектром электронов КЛ очень высоких энергий,  $E \geq 100$  ГэВ с  $\alpha_{\text{obs}} \geq 3$ , если предположить спектр инжекции первичных электронов с разумным показателем  $\alpha \sim 2.2 - 2.3$ .

В области  $E \sim 10$  ГэВ отношение  $t_{\text{diff}}/t_c$  достигает своего минимума  $\sim 1$ . Поэтому при этих энергиях электроны, инжектируемые в межзвездную среду из далеких источников, доходят до нас наиболее эффективно. При меньших энергиях  $t_{\text{diff}}/t_c$  вновь возрастает. В результате в рамках двухкомпонентной 'G+L' модели в области  $E < 10$  ГэВ возникают достаточно жесткие спектры, близкие к наблюдаемым потокам электронов. Заметим, что в рамках стандартных моделей с непрерывным распределением источников ожидаются потоки ГэВ-ных электронов, существенно превосходящие измеренные потоки в этой области, но близкие к тем, которые получаются из анализа радиоданных, дающих, однако, информацию об электронной компоненте КЛ, *пронизываемую по Галактике вдоль луча зрения*.

В области  $E \gg 10$  ГэВ время радиационного охлаждения электронов  $t_c \propto 1/E$  уменьшается быстрее, чем время диффузии  $t_{\text{diff}} \propto E^{-6}$ , поэтому вклад от далеких источников (G-компонента) в наблюдаемый поток с увеличением энергии уменьшается, в то же время как вклад от близкого источника растет. Таким образом, в области  $10 \text{ ГэВ} \leq E \leq 100 \text{ ГэВ}$

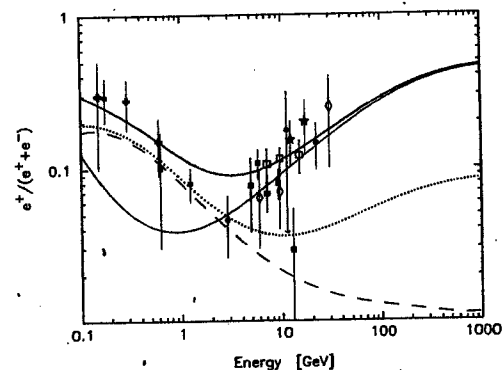


Рис. 4: Зарядовый состав электронной компоненты КЛ для спектров, представленных на рис.3, в предположении, что источником L-компоненты является пульсар (инжектор  $e^- - e^+$  пар), либо сверхновая.

происходит постепенная замена преимущественного вклада G-компоненты на вклад от L-компоненты. Однако, этот переход от G- к L-компоненте происходит гладко и не проявляется в полном спектре 'G+L', который во всей области энергий  $10 \text{ ГэВ} < E \leq 2 \text{ ТэВ}$  хорошо аппроксимируется единой степенной функцией (см. рис.3). В то же время (§ 6.4), если зарядовый состав L-компоненты будет отличаться от преимущественно негatronного состава G-компоненты, то в области высоких энергий естественно ожидать практически любое anomalно высокое (по сравнению со вкладом лишь позитронов вторичного происхождения в КЛ) отношение  $e^+/(e^- + e^+)$ , что показано на рис.4. В § 6.4 обсуждаются также те требования, которые должны выполняться для источника (или нескольких источников) высокоэнергичных электронов в нашей локальной окрестности.

В Главе 7 проводится детальное исследование вопроса об эволюции во времени спектров  $\gamma$ -излучения гигантских молекулярных облаков (ГМО) вблизи ускорителя КЛ в широком диапазоне от высоких до сверхвысоких энергий.

Одним из важных результатов экспериментальной гамма-астрономии является обнаружение детекторами COS B и EGRET нескольких десятков дискретных источников в области высоких энергий,  $E_\gamma \geq 100 \text{ МэВ}$  в галактической плоскости, большинство из которых пока остаются неотожествленными, видными лишь в  $\gamma$ -диапазоне. Поскольку интенсивность генерации гамма-излучения определяется произведением плотности КЛ на плотность окружающего газа, то очевидными кандидатами, по крайней мере, для определенной части этих источников представляются ГМО с характерной плотностью

$n \sim 10^2 - 10^4 \text{ см}^{-3}$  и массами  $M \sim 10^3 - 10^6 M_\odot$ . Заметим, однако, что практически во всех работах, посвященных возможности генерации  $\gamma$ -излучения в ГМО, не рассматривался вопрос о корреляции потоков  $\gamma$ -квантов, ожидаемых в различные моменты времени в разных диапазонах энергий. Между тем, весьма важно представить, какую информацию мы ожидаем в принципе получить в результате гамма наблюдений ГМО.

В § 7.2 рассмотрена эволюция потоков релятивистских протонов в окрестности молодого источника КЛ. Не конкретизируя тип источника, рассматривается возможность как импульсивной ("мгновенной"), так и непрерывной инъекции КЛ в межзвездную среду. Как показывают расчеты, в окрестности 100 пк от источника с энерговыделением в ускоренных протонах  $W_p \sim 10^{50}$  эрг потоки КЛ на определенных стадиях эволюции может значительно превышать плотность энергии галактического "моря" КЛ (предположительно, совпадающим с уровнем КЛ в окрестности Земли). При этом, уровень превышения существенно зависит от характера источника, энергетического диапазона, и коэффициента диффузии. Соответствующие спектры излучательной способности вычислены в § 7.3.

В § 7.4 вычислены потоки  $\gamma$ -квантов, которые можно ожидать от газовых мишеней типа ГМО вблизи молодых ускорителей КЛ (таких как остатки сверхновых или пульсары) в разные моменты времени. При этом, обсуждается возможность расположения ускорителя как на некотором расстоянии вне, так и внутри облака. Показано, что даже облака с параметром  $M_5/d_{\text{кpc}}^2 \sim 0.1$  могут оказаться видимыми в гамма-лучах, в то время как для регистрации  $\gamma$ -излучения от облаков в галактическом "море" КЛ требуется  $M_5/d_{\text{кpc}}^2 \gg 1$ . Это обстоятельство существенно увеличивает число потенциальных источников как ГэВ-ного, так и ТэВ-ного  $\gamma$ -излучения. В случае зависящей от энергии частиц диффузии КЛ в окрестности ускорителя возможны, в зависимости от величин  $D(E)$ ,  $R$  и  $t$ , совершенно разные спектры  $\gamma$ -излучения. Поэтому регистрация  $\gamma$ -излучения в диапазоне от ГэВ-ных до ТэВ-ных энергий от облаков, расположенных на различных расстояниях от ускорителя может дать уникальную информацию о коэффициенте диффузии  $D(E)$ , а также о типе и возрасте ускорителя. В принципе, подобная информация может быть получена также и от одного гигантского облака, размеры которых могут достигать до нескольких десятков парсек, из анализа яркостного распределения  $\gamma$ -излучения.

В **Заключении** сформулированы **основные результаты и выводы** диссертационной работы:

**1. Исследованы некоторые процессы генерации и поглощения гамма-излучения в космических источниках.**

1.1. Исследованы спектры электрон-позитронных пар, рождающихся при поглощении гамма-квантов в изотропном поле фотонов. Получены простые аналитические выраже-

ния для спектра  $(e^-, e^+)$  пар в случае моноэнергетических распределений взаимодействующих фотонов, которые удобно использовать для вычисления функции генерации электронов в случае произвольных спектров фотонов.

1.2. Исследован также обратный процесс, именно, генерация гамма-излучения при аннигиляции  $(e^-, e^+)$  пар. В частности, вычислены спектры аннигиляционного излучения оптически тонкой электрон-позитронной тепловой плазмы с произвольной (нерелятивистской либо релятивистской) температурой  $T_e$ , и отмечен эффект "голубого" смещения и уширения аннигиляционной линии 0.511 МэВ. Для неравновесной  $(e^-, e^+)$  плазмы вычислена доля релятивистских позитронов,  $\sim (10 - 20)\%$ , аннигилирующих "на лету" до охлаждения (термализации) в окружающем газе.

1.3. Рассмотрена проблема установления равновесного (максвелловского) распределения частиц в изначально неравновесной плазме. Найдено аналитическое решение уравнения, описывающего эволюцию во времени высокоэнергичной ( $E \gg kT$ ) части функции распределения частиц. Использование полученного решения, в частности, для аккреционной плазмы позволяет сделать вывод о том, что генерация гамма-излучения в тепловой плазме при аккреции на нейтронную звезду или предполагаемую черную дыру является значительно *менее* эффективным процессом, чем предполагалось ранее.

**2. Проведен детальный количественный и качественный анализ эффективности различных механизмов генерации гамма-излучения в Крабовидной туманности.**

2.1. Предложена двухкомпонентная модель для релятивистских электронов в Крабовидной туманности, согласно которой в туманности существуют две популяции электронов:

- (а) электроны очень высоких энергий,  $E \gg 100$  ГэВ, которые ускоряются пульсаром и инжектируются в туманность в настоящую эпоху Краба ("молодые" электроны);
- и (б) электроны меньших энергий,  $E \leq 100$  ГэВ, которые ответственны за наблюдаемое синхротронное излучение от радио до инфракрасного/оптического диапазонов, и составляют популяцию старых электронов ("радио" электроны).

Показано, что в рамках магнитогидродинамической модели распространения "молодых" электронов и магнитного поля в туманности, предполагая ускорение электронов до  $E \geq 10^{15}$  эВ, синхротронное излучение может обеспечить хорошее согласие с наблюдаемыми потоками вплоть до  $\gamma$ -диапазона с  $E_\gamma \leq 1$  ГэВ.

2.2. Исследованы спектры гамма-излучения, генерируемого при обратном комптоновском рассеянии релятивистских электронов в Крабовидной туманности. Вычисления подтверждают результаты ряда предыдущих исследований в части, касающейся вывода о доминирующей роли процесса ОКР для генерации  $\gamma$ -квантов в диапазоне  $E \geq 1$  ТэВ.

Впервые показано, что абсолютные значения потоков ОКР излучения определяются практически лишь средним магнитным полем в туманности  $B_0$ , и получено простое аналитическое выражение, дающее возможность модельно-независимого определения  $B_0$  по интегральному потоку  $F_\gamma (> 1 \text{ ТэВ})$ .

2.3. Введено понятие *эффективной* плотности газа  $n_{\text{эф}}$ , и показано, что в среде с выраженным неоднородным распределением газа, эффективная плотность может существенно отличаться от средней плотности газа в туманности  $\bar{n} \approx 5 \text{ см}^{-3}$ . Впервые выдвинута гипотеза о возможности эффективного усиления вклада тормозного излучения релятивистских электронов в Крабовидной туманности, и показано, что в случае  $n_{\text{эф}} \approx 100 \text{ см}^{-3}$  этим механизмом оказывается возможным объяснить наблюдаемые потоки ГэВ-ного излучения. Учет тормозного излучения электронов в области энергий  $E \sim 0.1 - 1 \text{ ТэВ}$  вместе с комптоновским излучением приводит к формированию крутых степенных спектров с показателем  $\alpha_\gamma = 2.7$ , тогда как спектр чисто комптоновского излучения в этой области является значительно более жестким. Предложен ряд наблюдательных тестов для проверки гипотезы об эффективном усилении тормозного излучения, реализация которой связана с возможностью проникновения и частичного удержания релятивистских электронов в плотные филаменты, наблюдаемые в оптическом диапазоне.

2.4. Показано, что вклад в  $\gamma$ -излучение в результате неупругих  $p-p$  взаимодействий релятивистских протонов, наличие которых в Крабе теоретически не исключено, может быть заметным в лучшем случае лишь в области сверхвысоких энергий  $E \gg 10 \text{ ТэВ}$ .

3. Предложена модель ядер активных галактик с ускорением релятивистских протонов в окрестности массивной черной дыры и неизбежным образованием релятивистских нейтронов в неупругих взаимодействиях протонов с окружающим газом и полем излучения.

3.1. Исследована проблема переноса энергии релятивистскими нейтронами из центральной области основного энерговыделения на периферию ЯАГ вплоть до  $0.1 - 1 \text{ кпк}$ . Показано, что при жестких спектрах ускоренных протонов с показателем степени  $\alpha_p \approx 2$  результирующая эффективность преобразования гравитационной энергии аккреционной плазмы в энергию образующихся на больших расстояниях вторичных протонов (после распада нейтронов) может достигать значений  $\eta \approx 0.03$ .

3.2. Рассмотрен вопрос о самосогласованности предложенной модели ЯАГ. Показано, что аккреция плазмы может быть *стационарной* лишь в случае быстрого охлаждения распадных протонов (а) в результате неупругих взаимодействий с газом в плотных облаках, ответственных за линейчатое оптическое излучение и/или поглощение в ЯАГ; и (б) в результате генерации ими плазменной турбулентности.

4. Дано определение и разработана модель электрон-фотонного

каскада второго типа (ЭК-2), инициируемого в ядрах активных галактик релятивистскими нейтронами, и развивающегося в пространственно-неоднородном поле фонового низкочастотного излучения.

4.1. Определена система уравнений, описывающих развитие ЭК-2 в сферически симметричном поле фонового излучения ЯАГ с плотностью, убывающей на больших расстояниях по закону  $n_{\text{рф}} \propto r^{-2}$ .

4.2. Впервые предложено аналитическое решение в общем виде интегрального кинетического уравнения для релятивистских электронов (в однородной среде) в дельта-функциональном приближении для интегрального ядра. Полученное решение дает возможность исследовать спектры релятивистских электронов, формируемые как в диапазоне непрерывных, так и катастрофических энергетических потерь.

4.3. Найдено общее аналитическое решение уравнения переноса излучения при заданных коэффициентах излучения и поглощения в сферически симметричном источнике.

4.4. Разработан экономичный итерационный метод для численного решения системы стационарных каскадных уравнений, позволяющий исследовать развитие ЭК-2 в огромных динамических диапазонах по пространственным и энергетическим переменным.

4.5. Проведено исследование влияния магнитного поля на эффективность развития электромагнитного (электрон-фотонного) каскада в радиационно доминированной среде. Показано, что магнитные поля на уровне равновесных (по плотности энергии) с окружающей аккреционной плазмой могут привести к заметному подавлению ЭК-2 в случае мощных ЯАГ со светимостью  $L_* \geq 10^{45} \text{ эрг/с}$ . Особенно сильно эффект подавления каскада сказывается в области ТэВ-ных энергий.

4.6. Показано, что для ЭК-2 аналогом параметра компактности  $l \propto L_*/R_*$  "стандартных" электрон-фотонных каскадов (т.е. развивающихся в пространственно однородном поле фонового излучения, ЭК-1) является интегральная светимость  $L_*$  в диапазоне от субмиллиметровых до рентгеновских длин волн. Вычислено критическое значение светимости,  $L_{\text{кр}} \approx 1.5 \times 10^{43} \text{ эрг/с}$ , при превышении которого спектр выходящего из ЯАГ  $\gamma$ -излучения высоких и очень высоких энергий определяется развитием ЭК-2.

4.7. Предсказывается, что при одинаковой яркости в оптическом-рентгеновском диапазоне, более перспективными для наблюдений в области ТэВ-ных энергий являются относительно менее мощные (и близкие) ЯАГ, чем далекие и мощные источники, например, квазары.

5. Предложена модель аккреционного плазменного турбулентного реактора (АПТР) с распределением релятивистских электронов максвелловского типа для ЯАГ.

5.1. Исследована самосогласованность обсуждаемых ранее моделей ПТР со степенны-

ми распределениями релятивистских электронов, ускоряемых в результате синхротронной реабсорбции радиоизлучения, либо на плазменной турбулентности. Показано, что такие спектры электронов являются неустойчивыми, и что в процессе стохастического ускорения в турбулентной среде формируются спектры релятивистских электронов максвелловского типа.

5.2. Разработана модель аккреционного ПТР, возникающая при аккреции плазмы с развитой турбулентностью на предполагаемую черную дыру в ЯАГ. Вычислены спектры синхро-комптоновского излучения АПТР, и показано, что в рамках единой нетепловой модели возможно самосогласованно объяснить наблюдаемые от ЯАГ плоские спектры радио-субмиллиметрового излучения с показателем  $\alpha_r \sim 0$  и убывающие степенные спектры в рентгеновском - мягком гамма-диапазоне с показателем  $\alpha_x \sim 0.7$ .

6. Предложена модель "облако-мишень под пучком релятивистских частиц", и исследована на качественном и количественном уровнях возможность приложения этой модели для интерпретации эпизодического аномально пульсирующего  $\gamma$ -излучения, наблюдаемого от рентгеновских двойных источников.

6.1. Предложен сценарий генерации гамма-излучения, основанный на гипотезе о спонтанных выбросах из нормальной звезды тесной двойной системы значительных масс вещества в виде плотных облаков, которые, в зависимости от траектории своего движения, могут попадать под пучок релятивистских частиц, ускоряемых нейтронной звездой (либо белым карликом в случае катаклизмической переменной АЕ Aquarii).

6.2. Проведены аналитические оценки основных параметров, описывающих динамику облака, нагреваемого мощным пучком, и на примере Hercules X-1 показана реальность применения этой модели для интерпретации *всех* особенностей эпизодического аномально пульсирующего гамма-излучения рентгеновских двойных.

6.3. Впервые проведены численные расчеты электрон-фотонного каскада, развивающегося одновременно в трех средах: в веществе, в фотонном поле, в магнитном поле. Исследована эволюция во времени спектров электромагнитного излучения облака-мишени под пучком релятивистских частиц на разных стадиях развития движущейся и расширяющейся мишени.

6.4. Показано, что в рамках предложенной модели получают естественное объяснение наблюдаемые от Hercules X-1 вспышки пульсирующего с аномальной частотой оптического излучения, а также наблюдаемые от АЕ Aquarii радиовспышки.

6.5. Рассмотрена возможность применения модели "подвижная мишень под пучком релятивистских частиц" для интерпретации некоторых особенностей гамма-всплесков (в частности, наблюдаемых EGRET в области высоких энергий), предполагая в качестве

источника гамма-всплесков изолированный ускоритель (пульсар), а в качестве мишени - комету либо астероид.

7. Проведено исследование ряда проблем, связанных с корректной интерпретацией электронной компоненты космических лучей.

7.1. Исследована эволюция во времени спектров релятивистских частиц в окрестности точечного источника. В частности, показано, что в результате зависящего от энергии частиц диффузного распространения спектры первичных электронов от дискретного источника претерпевают существенную модификацию за времена, значительно меньшие времени их охлаждения в межзвездной среде.

7.2. Предложена двухкомпонентная модель для первичных электронов в составе КЛ, согласно которой вклады в наблюдаемый поток электронов от источников на больших от Земли расстояниях (G-компонента) следует разделять от вклада ограниченного числа близких и молодых источников (L-компонента). В рамках этой модели удастся, в частности, интерпретировать наблюдаемые в окрестности Земли жесткие спектры низкоэнергичных электронов ( $E \ll 10$  ГэВ) как следствие тормозных и ионизационных потерь энергии в процессе их распространения от далеких источников, и объяснить причину существенного расхождения между наблюдаемыми спектрами и спектрами электронов, соответствующих спектральным потокам галактического радиоизлучения, не прибегая к предположению о сильной модуляции ГэВ-ных электронов в межпланетном пространстве. В области очень высоких энергий, благодаря отмеченному эффекту модификации спектров электронов L-компоненты, возможно объяснить формирование мягких спектров с показателем  $\alpha_{\text{обы}} \simeq 3.1 - 3.3$ . Предсказывается высокая вероятность обнаружения нерегулярностей в спектрах электронов в области  $E \gg 100$  ГэВ.

7.3. В рамках предложенного двухкомпонентного подхода к интерпретации спектров электронов в КЛ впервые показано, что в области  $E \geq 10$  ГэВ следует ожидать аномально высокое содержание позитронов, если зарядовый состав первичных электронов локальной (L) компоненты существенно отличается от состава G-компоненты. Проводится также обсуждение различных объектов в нашей локальной окрестности в качестве возможных источников наблюдаемых ТэВ-ных электронов.

8. Исследована проблема эволюции во времени спектральных потоков высокоэнергичного гамма-излучения, которые можно ожидать из окрестности дискретных ускорителей КЛ в широком диапазоне от высоких до сверхвысоких энергий.

8.1. Вычислены спектры релятивистских протонов и соответствующие излучательные способности в окрестности молодого ускорителя на различных стадиях (моментах времени  $t$ ). Рассмотрены случаи как стационарного, так и импульсивного инжектора

КЛ. Показано, что излучательная способность в гамма-квантах от распада  $\pi^0$  в окрестности  $R < 100$  пк от молодого ускорителя КЛ с энерговыделением  $W_p \sim 10^{49} - 10^{50}$  эрг может существенно превышать излучательную способность галактического "моря" КЛ. Показано, что это превышение будет особенно выраженным в случае относительно медленного распространения КЛ в окрестности ускорителя, с коэффициентом диффузии  $D_{10} \ll 10^{28} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

8.2. Вычислены потоки  $\gamma$ -излучения, ожидаемого от гигантских молекулярных облаков в случае расположения ускорителя вблизи либо внутри них. Показано, что в зависимости от расположения ускорителя и облака-мишени, типа и возраста ускорителя, и коэффициента диффузии  $DE$ , можно ожидать очень различные формы спектров  $\gamma$ -излучения в широком диапазоне от ГэВ-ных до ТэВ-ных энергий. Показано также, что наблюдаемые потоки  $\gamma$ -излучения ГэВ-ных энергий можно ожидать даже от облаков с параметром  $M_b/d_{\text{кpc}} \sim 0.1$ , что резко увеличивает число потенциально наблюдаемых ГМО в Галактике. Оба этих обстоятельства существенно усиливают аргументы в пользу гипотезы об ассоциации многих неотожествленных источников  $\gamma$ -излучения, обнаруженных в диапазоне высоких энергий  $E \geq 100$  МэВ спутниками COS B и EGRET в галактической плоскости, с молекулярными облаками вблизи ускорителей КЛ. Отмечено также, что более информативными для выяснения природы источников КЛ и параметров окружающей их среды могут оказаться наблюдения  $\gamma$ -излучения ГМО в ТэВ-ном диапазоне энергий.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

*Статьи в рецензируемых журналах*

1. Aharonian F.A., Atoyan A.M. "Cosmic Gamma-Rays Associated with Annihilation of Relativistic  $e^+ - e^-$  Pairs" - 1981, *Phys. Letters*, v.99B, p.301-304.
2. Агаронян Ф.А., Атоян А.М. "К вопросу о происхождении галактического аннигиляционного излучения" - 1981, *Письма в АЖ*, т.7, с.713-719.
3. Aharonian F.A., Atoyan A.M. "Compton Scattering of Relativistic Electrons in Compact Sources" - 1981, *Astrophys. Sp. Sci.*, v.79, p.321-336.
4. Aharonian F.A., Atoyan A.M., Sunyaev R.A. "Radiation Spectrum of Optically Thin Relativistic Electron-Positron Plasma" - 1983, *Astrophys. Sp. Sci.*, v.93, p.229-245.
5. Агаронян Ф.А., Атоян А.М. "К вопросу о временной эволюции функции распределения частиц в высокотемпературной плазме" - 1983, *ЖЭТФ*, т.85, с.1857-1865.
6. Агаронян Ф.А., Атоян А.М., Нагапетян А.Г. "Фоторождение электронно-позитронных пар в компактных рентгеновских источниках" - 1983, *Астрофизика*, т.19, с.323-334.
7. Агаронян Ф.А., Атоян А.М. "Гамма-кванты сверхвысоких энергий - носители космо-

логической информации" - 1985, *ЖЭТФ*, т.89, с.337-345.

8. Aharonian F.A., Atoyan A.M., Nahapetian A. "On the Possible Acceleration Mechanisms Leading to Formation of Maxwell-Like Spectra of Relativistic Electrons in Turbulent Synchrotron Sources" - 1986, *Astron. Astrophys.*, v.162, p.L1-L2.
9. Атоян А.М., Нагапетян А.Г. "Компактные радиоисточники как плазменный турбулентный реактор. I. Формирование спектров релятивистских электронов максвелловского типа при ускорении на резонансных ленгмюровских волнах" - 1987, *Астрофизика*, т.26, с.527-545.
10. Атоян А.М., Нагапетян А. "Компактные радиоисточники как плазменный турбулентный реактор. II. Основные характеристики спектров электромагнитного излучения" - 1987, *Астрофизика*, т.27, с.117-130.
11. Atoyan A.M., Nahapetian A. "Active Galactic Nuclei as Accreting Turbulent Synchrotron-self-Compton Sources" - 1989, *Astron. Astrophys.*, v.219, p.53-62
12. Атоян А.М., Нагапетян А.Г. "Компактные радиоисточники как плазменный турбулентный реактор. III. Аккреционная модель" - 1990, *Астрофизика*, т.32, с.341-356.
13. Aharonian F.A., Atoyan A.M. "Cosmic Ray Positrons Connected with Galactic Gamma-Radiation of High and Very High Energies" - 1991, *Journal of Phys.* v.17G, p.1769-1778.
14. Aharonian F.A., Atoyan A.M. "A Model of Pulsed Gamma-Radiation from the X-Ray Binary Hercules X-1/HZ Herculis" - 1991, *Astrophys. J.*, v.381, p.220-227.
15. Atoyan A.M. "Relativistic Neutrons in AGN. I: Energy Transport from the Core" - 1992, *Astron. Astrophys.*, v.257, p.465-475.
16. Atoyan A.M. "Relativistic Neutrons in AGN. II: Gamma-Rays of High and Very High Energies" - 1992, *Astron. Astrophys.*, v.257, p.476-488.
17. Aharonian F.A., Atoyan A.M., Völk H.J. "High Energy Electrons and Positrons in Cosmic Rays as an Indicator of the Existence of a Nearby Cosmic Tevatron." - 1995, *Astron. Astrophys.*, v.294, L41-L44.
18. Atoyan A.M., Aharonian F.A., Völk H.J. "Electrons and Positrons in the Galactic Cosmic Rays" - 1995, *Phys. Rev. D*, v.52, p.3265-3275.
19. Aharonian F.A., Atoyan A.M., "Does the Inverse Compton Mechanism Alone Explain the GeV/TeV Gamma-Ray Emission from the Crab Nebula?" - 1995, *Astropart. Phys.*, v.3, p.275-282.
20. Atoyan A.M., Aharonian F.A. "Beam-Meets-Target: a Model for Episodic Gamma-Ray Sources" - 1995, *Astrophys. Sp. Sci.*, v.231, p.199-202.
21. Aharonian F.A., Atoyan A.M. "Possible Episodic Gamma-Ray Sources: Moving Fragile Target Crosses Relativistic Particle Beam" - 1996, *Space Sci. Reviews*, v.75, p.357-373.
22. Atoyan A.M., Aharonian F.A. "On the Mechanisms of Gamma-Radiation in the Crab

Nebula" - 1996, *M.N.R.A.S.*, v.278, p.525-541.

23. Atoyan A.M., Aharonian F.A. "On the Fluxes of Inverse Compton Gamma-Rays Expected from the Crab Nebula" - 1996, *Astron. Astrophys. (Suppl)*, in press.

24. Aharonian F.A., Atoyan A.M. "On the Emissivity of  $\pi^0$ -decay Gamma Radiation in the Vicinities of Accelerators of Galactic Cosmic Rays" - 1996, *Astron. Astrophys.*, in press.

*Статьи в изданиях конференций*

25. Aharonian F.A., Atoyan A.M. "Ultrahigh Energy Gamma-Rays as Carriers of Cosmological Information" - 1985, *Proc. 19-th ICRC*, La Jolla, p.306-309.

26. Aharonian F.A., Atoyan A.M. "A Model of Photon Origin of High-Energy Cosmic-Ray Positrons" - 1990, *Proc. 21-st ICRC*, Adelaide, v.3, 269-272.

27. Atoyan A.M. "High Energy and Very High Energy Gamma-Rays from Electromagnetic Cascade Induced by Relativistic Neutrons in AGN" - 1991, *Lecture Notes in Physics*, v.391, 168-172, (Proc. Workshop 'Relativistic Hadrons in Cosmic Compact Objects', 1990, Poland)

28. Aharonian F.A., Atoyan A.M. "On the Gamma-Ray Emission Mechanisms in the Crab Nebula" - 1995, *24-th ICRC*, Rome, v.2, p.358-361.

29. Atoyan A.M., Aharonian F.A., Völk H.J. "Energy-Dependent Propagation of High Energy Electrons from a Single Nearby Source" - 1995, *24-th ICRC*, Rome, v.3, p.21-24.

30. Atoyan A.M., Aharonian F.A. "On the Flaring Activity of the AE Aquarii in the Radio, Optical, and VHE Gamma-Rays" - 1995, *24-th ICRC*, Rome, v.2, p.370-373.

A. M. Atoyan

MODELS OF GAMMA-RAY PRODUCTION  
IN THE SOURCES OF COSMIC RAYS

Number of models of the gamma-ray production and propagation in the galactic and extragalactic cosmic ray (CR) sources, as Supernova remnants, pulsars, and active galactic nuclei (AGN), are proposed.

Different mechanisms of gamma-ray production in the Crab Nebula are studied. The hypothesis of possible enhancement of the relativistic electron bremsstrahlung in dense optical filaments is suggested. The model of electron-photon cascade, induced in AGNs by relativistic neutrons is developed. A method to solve the system of relevant cascade equations is developed, and detailed investigation of the resulting gamma-ray spectra is carried out.

The model of accretion plasma turbulent reactor to explain general features of the nonthermal radiation spectra of AGNs from radiowavelengths to hard X-rays are proposed.

The model "Moving target under the relativistic particle beam" is proposed, in the framework of which all peculiarities of the reported episodic gamma-ray events from X-ray binaries can be explained. Possible application of the model to explain some features of the high-energy gamma-ray bursts (assuming isolated pulsars as the particle accelerator) is discussed.

The two-component approach for correct interpretation of the CR electron spectra are developed.

The problem of evolution of the fluxes of high and very high energy gamma-rays expected from the giant molecular clouds in the vicinities of young sources of galactic CRs is studied.

Ա. Մ. Աթոյան

**ՏԻՆՏԵՐԱԿԱՆ ՀԱՈՍԳԱՑՔՆԵՐԻ ԱՂՔՅՈՒՐՆԵՐՈՒՄ  
ԳԱՄՍԱ ՀԱՈՍԳԱՑՔՄԱՆ ԱՈՍՋԱՑՄԱՆ ՍՈՒՅԼՆԵՐ**

Ատենախառնությունը ելինոված է տիեզերական ճառագայթների աղբյուրներում գամմա ճառագայթման շոռաջացման և տարածման մոդելների մշակմանը: Մասնավորապես՝

Մանրամասն քննարկված են հետզգետևաձև միգամածությունում գամմա ճառագայթների առաջացման տարբեր մեխանիզմներ: Ցույց է տրված ռեյաստիվիստիկ էլեկտրոնների արգելակային ճառագայթման բարձր էֆեկտիվության հնարավորությունը:

Առաջարկված է ակտիվ գալակտիկաների միջուկներում (ԱԳՄ) ռեյաստիվիստիկ էլեկտրոններով առաջացված էլեկտրոն-ֆոտոնային հեղեղների մոդել: Մասկված է հեղեղային հավասարումների համակարգի լուծման եղանակ: Մանրամասն հետազոտված են տարբեր կոորդինատներով ԱԳՄ-ներից բարձր և գերբարձր էներգիաների գամմա ճառագայթման հոսքերը:

Առաջարկված է զարթվող թիրախը ռեյաստիվիստիկ մասնիկների փնջի տակ» մոդելը, որի շրջանակներում հնարավոր է լինում բացատրել ռենտգենյան կրկնակի աստղերից գրանցվող եպիզոդիկ գամմա ճառագայթման բոլոր յուրահատկությունները:

Մշակված է տիեզերական ճառագայթների կազմում էլեկտրոնների համար նրկվածպոնենտ մոդել, որը բացատրում է գրանցվող տիեզերական էլեկտրոնների սպեկտրայ մի շարք հատկություններ:

Մանրամասն քննարկված է տիեզերական ճառագայթների երիտասարդ աղբյուրների շրջակայքից սպասվող գամմա ճառագայթման ժամանակային և տարածական զարգացման հիմնահարցը: