1974 г. Март *Том 112, вып. 3*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.165(023)

АСТРОНОМИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ*)

Г. Фридман

ОТ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Последние десятилетия ознаменовались в астрономии подлинной революцией. Основными атрибутами подобной ситуации являются не отдельные, даже самые выдающиеся открытия, а изменение самого духа астрономии. Вплоть до начала XX столетия *астрономия была наукой о стационарных объектах. Последние же десятилетия были* посвящены в основном исследованиям нестационарных и, в частности, взрывных объектов, к которым следует отнести и Вселенную. Именно работы А. Фридмана и Хаббла о расширении Вселенной послужили толчком к изменению точки зрения об исключительной стационарности космических объектов.

Здесь есть и другая сторона; стационарные объекты (типа нашего Солнца) излучают, как правило, в оптическом диапазоне. Основная доля излучения нестационарных объектов чаще лежит в иных диапазонах (радио-, инфракрасном или рентгеновском). Это обусловлено различной природой процессов, происходящих в стационарных и нестационарных объектах. Обычные звезды находятся в состоянии, близком к тепловому равновесию, с температурой в несколько тысяч градусов, соответствующей оптическому диапазону. В существенно нестационарных объектах ситуация совершенно иная: движения колоссальных масс ионизованного вещества сопровождаются выделением огромного количества энергии в форме космических лучей, которые, взаимодействуя с газом, магнитными полями и электромагнитным излучением, порождают кванты во всех диапазонах.

Открытие космических объектов, динамика которых в значительной степени определяется частицами высоких энергий, совпало по времени с бурным развитием новой отрасли наблюдательной астрономии — астрономии высоких энергий. Возможности исследования жесткого космического излучения резко возросли после запуска первых космических обсерваторий: «рентгеновского» спутника SAS-1 («Ухуру») и спутника SAS-B с искровой камерой на борту, предназначенного для изучения космического γ-излучения. Эти небольшие спутники являются прототипами будущих сложных астрономических обсерваторий, роль которых в развитии астрономии в последующие десятилетия трудно переоценить.

Поэтому статья «Астрономия высоких энергий», в которой Г. Фридман, один из основоположников рентгеновской астрономии, увлекательно рассказывает о последних достижениях астрономии высоких энергий (в особенности рентгеновской астрономии), будет весьма полезна для всех, кто интересуется последними достижениями в изучении Вселенной.

И. Л. Розенталь

АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

Успехи атомной и молекулярной физики существенно способствовали развитию наших представлений о строении и эволюции звезд и галактик. Сейчас на очереди более глубокое понимание строения скоплений и сверх-

*) Herbert Friedman, High Energy Astronomy, AIAA Paper No. 73—197. Перевод О. Ф. Прилуцкого, под редакцией И. Л. Розенталя. Публикуется с незначительными сокращениями.

Герберт Фридман — сотрудник Научно-исследовательской лаборатории ВМС США. Он — один из основателей нового научного направления — астрономии высоких энергий, активно работающий в этой области исследований с начала 50-х годов.

скоплений, простирающихся вплоть до границ области пространства, доступной астрономам-наблюдателям. Вопросы, связанные с расширением, сжатием и возможным повторным расширением наблюдаемой совокупности галактик, занимают в современной астрофизике видное место. Эти вопросы, наряду с проблемами космологии и объяснением природы явлений, обнаруженных астрономами в последние годы, стали одними из фундаментальных проблем современной физики.

Теория гравитации Эйнштейна — общая теория относительности — привела молодого советского математика Александра Фридмана к созданию концепции расширяющейся Вселенной. Это произошло всего за несколько лет до того, как Хаббл приступил к подробным исследованиям красных смещений удаленных галактик. Со временем эти исследования превратились в целое направление, занимающее важное место в наземной астрономии наших дней.

Хабблу удалось обнаружить, что в области пространства, доступной его телескопу, скорость разбегания галактик прямо пропорциональна расстоянию между ними. Этот результат, подтверждающий теорию А. Фридмана, прямо приводит к концепции образования Вселенной в так называемом «большом взрыве» *).

Согласно эволюционной космологии около 10 миллиардов лет назад все вещество и вся энергия Вселенной были сосредоточены в первоначальном «огненном шаре». Расширение Вселенной началось с момента взрыва «огненного шара», и сегодня мы можем наблюдать эхо «большого взрыва» в форме 3-градусного микроволнового фонового излучения, равномерно заполняющего Вселенную. Вначале излучение «огненного шара» с температурой в несколько миллиардов градусов было сосредоточено в рентгеновском и γ-диапазонах. В процессе расширения Вселенной излучение остыло до 3 °К, и в нашу эпоху энергия реликтового излучения переносится в основном микроволновыми и инфракрасными фотонами. Максимум интенсивности реликтового излучения соответствует длине волны $\lambda \approx 1$ *мм*.

Спустя несколько минут после начала расширения в веществе «огненного шара» начались ядерные реакции, и часть первичного водорода превратилась в гелий. Наблюдаемая распространенность гелия во Вселенной хорошо согласуется с предсказаниями теории «большого взрыва». Через 10^5 лет температура в «огненном шаре» снизилась до 3000° К, и в этот момент началось образование галактик из газа. Эволюция части галактик привела к образованию активных объектов, подобных квазарам и радиогалактикам, которые заполнили Вселенную космическими лучами. Частицы космических лучей могли прогреть остаточный межгалактический газ до температур порядка миллиона градусов, что позволило бы объяснить мягкое рентгеновское излучение в диапазоне 0,1—1 *кэв* тормозным излучением горячего межгалактического газа.

Несмотря на то, что изучением красных смещений в спектрах удаленных галактик занималось целое поколение астрономов, мы до сих пор не можем уверенно ответить на вопрос, будет ли расширение Вселенной продолжаться неограниченно («открытая Вселенная»), либо в какой-то момент времени под действием сил тяготения расширение Вселенной сменится сжатием («закрытая Вселенная»). Дело в том, что максимальное расстояние, с которого нормальные галактики могут наблюдаться существующими телескопами, не превышает пяти миллиардов световых лет,

---

*) В этой статье под Вселенной понимается область пространства, доступная наблюдениям (Метагалактика). (*Прим. ред.*)

что соответствует предельному красному смещению $\delta\lambda/\lambda \approx 0{,}4$ *). В этом случае различие в светимости галактик в «открытой» и «закрытой» Вселенной не превышает одной звездной величины, что значительно меньше неопределенности, вызванной разбросом результатов наблюдений и отсутствием подходящего «стандартного маяка» для калибровки межгалактических расстояний.

Развитие радиоастрономии и появление космической астрономии высоких энергий привело к существенному расширению границ наблюдаемой части Вселенной. Астрономия высоких энергий может дать ответ на один из фундаментальных вопросов, определяющих динамику Вселенной,— вопрос о балансе массы и средней плотности вещества во Вселенной. Известно, что суммарная масса звездной составляющей галактик существенно меньше массы, необходимой для того, чтобы Вселенная была «закрытой» **). Обнаружить «недостающую массу», находящуюся в форме межгалактического газа с плотностью порядка 10^{-29} *г/см*^{3} (около 10^{-5} *протон/см*^{3}) способны лишь рентгеновская и γ-астрономия. Невидимая материя может быть сосредоточена и в весьма компактных телах. Одними из наиболее плотных объектов ($\rho \sim 10^{14}$ *г/см*^{3}) являются нейтронные звезды, наблюдаемые как радио- или рентгеновские пульсары или как компактные рентгеновские источники в двойных системах. Еще большей плотностью могут обладать так называемые «черные дыры», которые согласно теории могут быть мощными рентгеновскими источниками.

В последние годы предметом экспериментальных и теоретических исследований стали такие проблемы, как физика вещества на ранней стадии расширения Вселенной, «исчезновение» вещества в «черных дырах», зарядовая асимметрия Вселенной, излучение нейтрино в процессах ядерного горения, гравитационное излучение. Ни одна из научных дисциплин, кроме астрономии, не испытала за последнее десятилетие такой лавины удивительных открытий. Немалую долю сюрпризов принесло изучение картины Вселенной, открывающейся нам из космического пространства. Я расскажу здесь о некоторых из открытий, сделанных в области астрономии высоких энергий.

РЕНТГЕНОВСКАЯ АСТРОНОМИЯ

Кульминацией десятилетнего периода предварительных наблюдений в рентгеновском диапазоне, проводимых с ракет и высотных аэростатов, стал запуск малого астрономического спутника (SAS-1, или «Ухуру» ***)) в конце 1970 г.— первой рентгеновской обсерватории в космосе. Это событие увенчало период появления новой фундаментальной информации о нестационарных процессах во Вселенной, сопровождаемых генерацией частиц высоких энергий. Наряду с последующими запусками спутников SAS-B (для γ-астрономии) и SAS-C (для рентгеновской астрономии) в 1973 ****) и 1974 гг. и серии тяжелых спутников НЕАО (астрономических обсерваторий высоких энергий) в конце 70-х годов, вывод ИСЗ

---

*) Указанная Г. Фридманом величина предельного красного смещения относится лишь к нормальным галактикам. Красные смещения квазаров значительно больше (наибольшим красным смещением обладает квазар: $\delta\lambda/\lambda = Z = 3{,}5$). (*Прим. ред.*)

**) Критическая плотность, разделяющая «открытую» Вселенную от «закрытой», равна $\rho_c \sim 10^{-29}$ *г/см*^{3}. (*Прим. ред.*)

***) Название «Ухуру» («Свобода» на суахили) связано с тем, что ИСЗ SAS-1 был запущен с полигона Сан-Марко в Кении 12 декабря 1970 г., в день седьмой годовщины независимости Кении. (*Прим. ред.*)

****) ИСЗ SAS-B выведен на орбиту 15 ноября 1972 г. (*Прим. ред.*)

SAS-1 на орбиту является важным событием в развитии космических исследований.

Результатом наблюдений на спутнике «Ухуру» стало открытие множества рентгеновских источников, светимость которых в рентгеновском диапазоне в сотни и тысячи раз превышает светимость в оптическом и радиодиапазоне. Многие из обнаруженных источников переменны, причем параметры вариаций интенсивности меняются в широких пределах. Дискретные источники проявляются на диффузном фоне рентгеновских лучей, которые могут генерироваться в межзвездном или межгалактическом пространстве либо в мириадах неразрешенных дискретных источников, расположенных на больших расстояниях.

ИСЗ «Ухуру» успешно функционировал в течение двух лет со дня запуска. На основании полученных с помощью «Ухуру» данных был составлен каталог из 125 рентгеновских источников. Две трети источников группируются вблизи галактической плоскости, и, скорее всего, принадлежат нашей Галактике. У остальных источников галактическая широта превышает $\pm 20°$, и они могут быть связаны с внегалактическими объектами. Значительная часть высокоширотных источников отождествлена с радиогалактиками, сейфертовскими галактиками, квазарами и скоплениями галактик. Среди галактических источников выделяется группа остатков сверхновых, в которую входят Крабовидная туманность, остаток Сверхновой Тихо Браге 1572 г., Кассиопея А и Петля в Лебеде. Эти источники отличаются относительной стабильностью характеристик рентгеновского излучения. Для других источников характерна очень сильная переменность, проявляющаяся в шумовых флуктуациях интенсивности продолжительностью в несколько миллисекунд либо в исключительно точной периодичности пульсаров и затменных двойных систем. Помимо этого наблюдаются рентгеновские источники, сходные с новыми звездами: внезапно вспыхивающие до яркости, превышающей яркость любого из галактических источников, и постепенно угасающие в течение нескольких месяцев.

По спектральным характеристикам рентгеновские источники можно разделить на два типа: тепловые и нетепловые. В тепловых источниках в горячем газе образуется тормозное излучение со спектром, соответствующем оптически тонкой плазме или черному телу; в нетепловых источниках рентгеновские фотоны возникают либо в процессе синхротронного излучения релятивистских частиц, движущихся по спирали в магнитных полях, либо в процессе обратного комптоновского рассеяния, при котором фотоны микроволнового, инфракрасного и светового излучений, сталкиваясь с энергичными электронами, резко увеличивают свою энергию. Светимость большинства рентгеновских источников превышает 10^{36} *эрг/сек*, что в тысячу раз превосходит полную светимость Солнца во всех диапазонах. В нашей Галактике и в туманности Андромеды *) обнаружены звездоподобные источники рентгеновского излучения со светимостью порядка 10^{38}—10^{39} *эрг/сек*. Полная рентгеновская светимость нормальных галактик, подобных Млечному Пути или туманности Андромеды, составляет 10^{39}—10^{40} *эрг/сек*. Светимость мощных радиогалактик, сейфертовских галактик и квазаров в рентгеновском диапазоне может достигать значений порядка 10^{46} *эрг/сек* — в тысячу раз бо́льших светимости гигантских спиральных галактик в оптическом диапазоне.

*) В научной периодике до сих пор не появилось сообщений о звездоподобных источниках рентгеновского излучения в туманности Андромеды. Однако в Магеллановых Облаках были обнаружены рентгеновские источники со светимостью, превышающей 10^{38} *эрг/сек*. (*Прим. ред.*)

СВЕРХНОВЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

Проблема «внезапной смерти» звезд — одна из самых интересных в астрофизике. Явление взрыва сверхновой лежит в основе процессов, приводящих к синтезу всех элементов тяжелее углерода. Гравитационный коллапс, сопровождающий взрыв сверхновой, может привести к образованию нейтронных звезд или «черных дыр». Пульсары, отождествляемые с быстро вращающимися нейтронными звездами, генерируют космические лучи и рентгеновское излучение, а также радио- и гравитационные волны *), которые могут быть зарегистрированы на Земле.

Астрофизики разработали множество вариантов конечных стадий эволюции звезд. Возможно, что в процессе эволюции бóльшая часть звездного вещества будет выброшена в одном мощном взрыве (или в серии повторяющихся вспышек) либо будет унесена квазистационарным звездным ветром. После выгорания водорода в ядерных реакциях звезда может сжиматься до тех пор, пока не достигнет стадии белого карлика, на которой силы гравитационного притяжения уравновешиваются давлением вырожденного электронного газа. Диаметры белых карликов малы, они сравнимы с диаметром Земли, но плотность вещества в центре белых карликов может достигать 10^9 *г/см*^{3}. В звездах, находящихся на других стадиях эволюции, гравитационный коллапс может сжать вещество до ядерных плотностей ($\sim 10^{14}$ *г/см*^{3}), при которых отдельные нуклоны будут находиться в тесном контакте друг с другом. Силе гравитации здесь противостоит давление вырожденных нуклонов; радиус нейтронных звезд по порядку величины равен 10 *км*, а масса, по-видимому, не должна превышать двух-трех масс Солнца.

Если звезда до коллапса была достаточна массивна ($M \gtrsim 2M_\odot$), то она должна проскочить стадию ядерных плотностей и образовать «черную дыру». В этом случае сила притяжения будет настолько велика, что излучение не сможет покинуть «черную дыру». Единственная наблюдаемая характеристика «черной дыры»— ее внешнее гравитационное поле. Однако наиболее перспективным способом обнаружения «черных дыр» следует считать регистрацию рентгеновского излучения, образующегося при падении заряженных частиц на «черные дыры».

Среди всех остатков сверхновых наиболее изучена Крабовидная туманность. В ней находится пульсар, который, без сомнения, образовался при вспышке Сверхновой в 1045 г. И туманность, и пульсар наблюдались в широком диапазоне спектра электромагнитных волн — от радиоволн до рентгеновских лучей, а пульсации были обнаружены и в диапазоне γ-лучей. Туманность выглядит запутанным клубком ярких нитей, выделяющихся на фоне аморфной массы газа. Она пронизана магнитным полем, по порядку величины равным 10^{-4} *гс*. Релятивистские электроны, движущиеся по спиральным траекториям в магнитном поле, генерируют синхротронное излучение во всем диапазоне длин волн, от радиоволн до рентгеновских лучей. Энергия электронов для генерации рентгеновских фотонов в килоэлектрон-вольном диапазоне должна превышать 10^{14} *эв*. Столь энергичные электроны излучают так интенсивно, что их энергия заметно уменьшается на протяжении нескольких лет. Для поддержания рентгеновского излучения необходима непрерывная инжекция электронов из центрального источника. Радиус туманности, наблюдаемой

*) Мощность гравитационного излучения известных пульсаров сравнительно мала, и регистрация приходящих от пульсаров гравитационных волн находится за пределами возможностей существующих и проектируемых детекторов гравитационных волн. (*Прим. ред.*)

в рентгеновских лучах, приблизительно равен световому году, что соответствует времени жизни электронов, выброшенных из центрального источника.

Вскоре после открытия первых радиопульсаров было обнаружено, что радиоизлучение Краба пульсирует с частотой, близкой к 30 *гц*. Поиск оптических пульсаций быстро увенчался успехом, и пульсар был отождествлен со слабой звездочкой вблизи центра туманности. Вслед за этим были обнаружены пульсации в инфракрасном, рентгеновском и γ-диапазоне, причем основная доля энергии, излучаемой пульсаром, приходится на рентгеновский и γ-диапазон. Поток энергии пульсирующего рентгеновского излучения в тысячу раз больше потока энергии радиоизлучения и в сто раз больше потока энергии оптического излучения пульсара. Все наблюдаемые свойства пульсара укладываются в рамки модели вращающейся нейтронной звезды с магнитным дипольным полем порядка 10^{12} *гс*. Кинетическая энергия вращения уменьшается со скоростью порядка 10^{38} *эрг/сек*, что подтверждается небольшим, но довольно точно измеренным возрастанием периода пульсара. Энергия вращения с высокой эффективностью передается релятивистским частицам, «впрыскиваемым» в туманность, генерирующим синхротронное излучение с мощностью, в 10^4 раз превышающей мощность излучения Солнца, на протяжении 900 лет с момента события, приведшего к образованию пульсара.

В настоящее время пульсар в Крабе — единственный среди 60 радиопульсаров, у которого обнаружено пульсирующее рентгеновское излучение. Изучение пульсара в Крабе — уникальная возможность получения наблюдательных данных для развития теории компактных звездоподобных объектов и физики экстремального состояния вещества, характерного для этих объектов. Согласно современным представлениям радиус пульсара в Крабе — всего 10 *км*, плотность вещества в ядре — $3 \cdot 10^{14}$ *г/см*^{3}; ядро пульсара окружено кристаллической корой толщиной в несколько километров. Во внутренней части коры прочность вещества пульсара в 10^{16} раз больше, чем у стали, а электропроводность — в 10^5 раз выше, чем у меди. Вещество под корой почти целиком состоит из нейтронов с малой примесью электронов и протонов. Нейтроны образуют сверхтекучую жидкость с равной нулю вязкостью и пренебрежимо малой теплоемкостью, в то время как протонная примесь образует сверхпроводник, в котором текут электрические токи, поддерживающие сильные магнитные поля пульсара.

СКОРПИОН X-1

Скорпион X-1 в созвездии Скорпиона, самый яркий источник в Галактике, был первым среди открытых рентгеновских источников. Он отождествлен со слабым голубым звездоподобным объектом 12-й величины с мерцающим оптическим излучением, подобным излучению бывшей Новой звезды. Рентгеновское излучение Скорпиона X-1 переменно: нередко наблюдаются вспышки с увеличением интенсивности в несколько раз за несколько минут и продолжительностью вспышки порядка десятков минут. Рентгеновский спектр Скорпиона X-1 обладает экспоненциальной формой, характерной для тормозного излучения оптически тонкой плазмы со средней температурой $5 \cdot 10^7$ °K; иногда температура понижается до $4 \cdot 10^7$ °K, а иногда повышается до 10^8 °K. Основная доля энергии излучается в диапазоне 1—10 *кэв* с тепловым спектром, однако в области более высоких энергий обнаружен нетепловой «хвост» спектра, а на другом конце шкалы, в области очень мягких рентгеновских лучей, наблюдается поглощение теплового излучения. В простейшей модели источника —

сферически-симметричном облаке горячей плазмы — для объяснения наблюдаемых характеристик излучения необходимо предположить, что радиус облака равен 10^9 *см*, а концентрация частиц в плазме близка к 10^{16} *см*$^{-3}$. Время радиационного охлаждения плазмы равно нескольким миллисекундам и для поддержания высокой температуры газа необходимо непрерывная подкачка энергии в плазму.

В ряде моделей Скорпиона X-1 предполагается, что источником энергии служит быстро вращающаяся нейтронная звезда с периодом меньше или порядка миллисекунд. Эта звезда окружена «коконом» газа, прогреваемом частицами высоких энергий, инжектируемыми центральным источником. В других моделях привлекаются двойные системы с аккрецией газа на компактный компонент — нейтронную звезду или белый карлик. Правда, до сих пор не было получено прямых подтверждений того, что Скорпион X-1 — член двойной системы, да и сходство с бывшей Новой может быть чисто поверхностным, но не следует забывать, что принадлежность к двойной системе может быть определенно установлена лишь тогда, когда луч зрения лежит в орбитальной плоскости системы. Если рентгеновский источник связан с компонентом двойной системы, находящимся на поздних стадиях эволюции, а другой компонент полностью заполняет полость Роша *), то масса может передаваться к рентгеновским источникам в виде потоков газа и затмения в данной системе наблюдаться не будут. Потоки газа могут сформировать кольцо вокруг компактного источника (белого карлика или нейтронной звезды), и в дальнейшем выпадать на его поверхность. Вспышки источника могут быть связаны с неравномерностью процесса аккреции.

Природа Скорпиона X-1 до сих пор не разгадана. По крайней мере еще один источник (Лебедь X-2) отождествлен с похожим на Скорпион X-1 оптическим объектом, и два источника (GX — 17 + 2 и GX — 9 + 1) связаны с аналогичными радиообъектами. Наблюдения, проведенные на трехэлементном радиоинтерферометре Национальной радиоастрономической обсерватории в Грин-Бэнк и в Голландии, помогли уточнить координаты этих рентгеновских источников. Радиоисточник, связанный со Скорпионом X-1, состоит из трех компонентов, расположенных вдоль прямой линии. Центральный компонент совпадает с рентгеновским источником, а внешние удалены от него примерно на 2′. Небольшие смещения одного из внешних компонентов были объяснены изменением направления потоков частиц, выброшенных из рентгеновского источника.

РЕНТГЕНОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ В ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ

Рентгеновский источник Лебедь X-1 был обнаружен во время обзора неба, проведенного Научно-исследовательской лабораторией ВМС США в 1965 г. Наблюдения 1966 г. показали, что за этот год интенсивность источника увеличилась в четыре раза. Последующие эксперименты на ракетах и высотных аэростатах подтвердили существование резких изменений интенсивности. После получения результатов наблюдений на «Ухуру» и последних экспериментов на ракетах стало ясно, что вариации интенсивности рентгеновского излучения Лебедя X-1 представляют собой случайный шум с большими флуктуациями продолжительностью от милисекунд до нескольких десятков секунд. После отождествления Лебедя X-1 с радиоисточником точность определения координат достигла 1″, что позволило отождествить его со спектрально-двойной системой с перио-

*) Полость Роша — область устойчивого удержания вещества гравитационным полем одной из звезд двойной системы. (*Прим. ред.*)

дом в 5,6 дня. Центральный объект двойной системы — сверхгигант спектрального класса B0 9-й звездной величины. Как правило, масса такой звезды близка к 12 $M_{\odot}$. В этом случае из характеристик двойной системы следует, что масса невидимого компонента должна превышать $3M_{\odot}$. Эта масса слишком велика для белого карлика, так что невидимый компонент должен представлять собой либо массивную нейтронную звезду, либо «черную дыру».

В течение полутора лет наблюдений с «Ухуру» периодических вариаций интенсивности Лебедя X-1 (с периодом в 5,6 дня) обнаружено не было, однако в марте-апреле 1971 г. наблюдалось резкое изменение среднего уровня интенсивности в четыре раза.

Два других рентгеновских источника, Центавр X-3 и Геркулес X-1, были отождествлены с двойными системами исключительно на основании наблюдений в рентгеновском диапазоне. Интенсивность Центавра X-3 пульсирует с периодом 4,8 *сек*, причем глубина модуляции достигает 90%. На исключительно стабильные быстрые пульсации накладывается орбитальное движение с периодом 2,087 дня. Масса центрального компонента двойной системы, определяемая из допплеровского изменения периода пульсаций, равна по крайней мере 15 $M_{\odot}$. Масса невидимого компонента, связанного с рентгеновским источником, близка к 0,1 $M_{\odot}$, что согласуется с моделью нейтронных звезд.

Источник в Геркулесе пульсирует с периодом 1,24 *сек*, и, так же как и у Центавра X-3, глубина модуляции пульсаций велика. Помимо этого, у Геркулеса X-1 наблюдается 36-дневный цикл вариаций интенсивности. Яркость источника велика в первые 9—10 дней цикла, а в последующие 26 дней уменьшается до значений, меньших пределов чувствительности аппаратуры. Согласно измерениям допплеровского изменения периода пульсаций максимальная масса рентгеновского источника лежит в пределах 0,2—3,0 $M_{\odot}$, а масса центрального объекта равна 1,2—3,2 $M_{\odot}$. Оптические объекты, связанные с Центавром X-3 и Геркулесом X-1, до сих пор не обнаружены *).

ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ

Среди обнаруженных внегалактических рентгеновских источников можно найти радиогалактики (такие, как Дева А (M 87), Центавр А (NGC 5128) и Персей А (NGC 1275)), сейфертовскую галактику NGC 4151, квазар 3C 273 и скопление галактик в Волосах Вероники. Большинство из них было открыто до запуска «Ухуру», однако лишь наблюдения со спутника позволили резко повысить точность измерений и расширить до сорока список рентгеновских источников с галактической широтой больше $\pm 20°$. Возможно, что бо́льшая часть высокоширотных рентгеновских источников окажется отождествленной с внегалактическими объектами.

В таких галактиках, как дева А, Центавр А и Персей А, наблюдаются активные ядра, в которых происходят повторяющиеся взрывы. Оптические наблюдения Девы А указывают на наличие выброса из центра галактики, длина которого достигает 4000 световых лет. В выбросе замечены несколько ярких «узелков». Согласно результатам ракетных наблюдений Девы А в рентгеновском диапазоне интенсивность и спектр источника резко

*) Недавно появились работы, в которых сообщается об отождествлении Геркулеса X-1 с двойной звездой HZ Her и открытии оптических пульсаций HZ Her с периодом 1,24 *сек*. Число рентгеновских источников, входящих в состав двойных систем, к маю 1973 г. достигло шести: Cen X-3, Her X-1 Cyg X-1, 2U0 900—40, 2U0115—73, CygX-3. (*Прим. ред.*)

изменялись на протяжении нескольких месяцев или лет. Однако наблюдения, проведенные на спутнике «Ухуру», не показали заметных изменений интенсивности в этом временно́м интервале. Средняя светимость Девы А в рентгеновском диапазоне близка к 10^{43} *эрг/сек*, что на два порядка величины превышает светимость в радиодиапазоне.

Радиоастрономы обнаружили в ядре Девы А исключительно компактный источник с диаметром около двух световых месяцев. Быстропеременное рентгеновское излучение могло бы возникнуть при обратном комптоновском рассеянии микроволновых и радиофотонов на релятивистских электронах в ядре Девы А. Были высказаны и предположения о том, что активность в ядре может быть вызвана либо массивным вращающимся объектом ($M \sim 10^5 - 10^6\ M_\odot$), либо скоплением пульсаров в ядре, либо группой «магнитоидов» с массой порядка $10^4\ M_\odot$, расположенных в ярких «узелках» выброса.

Центавр А, расположенный сравнительно недалеко от нашей Галактики, принадлежит к классу радиоисточников с областями излучения, симметрично расположенными по отношению к центральному объекту. Эта конфигурация указывает на то, что в прошлом в ядре галактики могла произойти серия взрывов, выбросивших облака излучающих релятивистских частиц в направлении общего галактического магнитного поля. В центре оптической галактики расположен компактный радиоисточник, а с центром радиоисточника совпадает «горячее пятно» инфракрасного излучения.

Структура радиоисточника Центавр А определяется двумя внутренними областями излучения, расположенными в 7′ от центра, и двумя внешними, удаленными от центра на 3°. Рентгеновский источник совпадает с центральной областью; рентгеновского излучения от внешних областей обнаружено не было. Поскольку релятивистские электроны, ответственные за генерацию радиоизлучения, подвержены обратному комптоновскому рассеянию на 3-градусном фоновом излучении, отсутствие наблюдаемого потока рентгеновских лучей позволяет определить ограничения на плотность энергии фонового излучения и величину магнитного поля в области излучения. Если положить, что величина магнитного поля в области излучения равна $4 \cdot 10^{-6}$ *гс*, что соответствует равному распределению энергии между магнитным полем и релятивистскими частицами, то эффективная температура фонового излучения не должна превышать 5,1 °К. Если считать, что температура фонового излучения равна 3 °К, то нижний предел величины магнитного поля в области излучения составит $1 \cdot 10^{-6}$ *гс*. Проведение комплексных наблюдений с повышенной точностью в радио-, инфракрасном и рентгеновском диапазонах позволит определить точные значения основных параметров довольно сложного источника Центавр А *).

Сейфертовские галактики составляют от 1 до 2% полного числа всех спиральных галактик. Они характеризуются небольшим, но исключительно ярким ядром, содержащим в области с радиусом порядка тысячи световых лет 10^9—10^{10} звезд. В оптическом спектре сейфертовских галактик обнаружены широкие эмиссионные линии, указывающие на высокие скорости движения газа. Галактика NGC 1275 по оптическим свойствам может быть отнесена к сейфертовским галактикам, а по свойствам радиоизлучения — к мощным радиогалактикам с резко выраженной перемен-

---

*) Наблюдения рентгеновского излучения Центавра А на «Ухуру» показали, что поток излучения от внешних областей в диапазоне 1—10 *кэв* не превышает 8×10^{-11} *эрг/см²сек* и при температуре фонового излучения 2,7 °К магнитное поле $H \gtrsim 6 \cdot 10^{-7}$ *гс*. (*Прим. ред.*)

ностью. Согласно интерферометрическим радионаблюдениям радиоисточник Персей А состоит из ядра и гало́, причем диаметр ядра не превышает одного светового года. Взрывы в ядре, повторяющиеся через несколько десятков лет, выбрасывают в гало́ облака релятивистских частиц, которые удерживаются в гало́ в течение миллионов лет. Инфракрасная светимость ядра на несколько порядков величины превышает оптическую, а светимость недавно обнаруженного рентгеновского источника сравнима с инфракрасной светимостью ядра.

К семейству внегалактических радиоисточников относятся и квазары. Эти объекты значительно компактнее нормальных галактик. Как правило, красные смещения квазаров велики и соответствуют весьма большим расстояниям. Если космологическая интерпретация красных смещений квазаров справедлива, то их светимость должна быть огромна. Несмотря на то, что объем квазара намного меньше объема нормальной галактики, его светимость во много раз больше. Оптическая светимость квазаров поразительна, но светимость в инфракрасном и рентгеновском диапазонах еще намного выше. Светимость квазара 3С 273 в рентгеновском диапазоне приблизительно равна 10^{46} *эрг/сек*, а оценка инфракрасной светимости приводит к значениям порядка 10^{48} *эрг/сек* *). Энергия, необходимая для поддержания излучения квазаров, превышает энергию, которая может выделиться при ядерных реакциях в звездах при допустимых значениях полной массы звезд.

Взрывное энерговыделение в области ядра наблюдается в объектах, составляющих 2—5% полного числа галактик. Не исключено, что сейфертовские галактики и квазары представляют собой определённые стадии эволюции активных ядер галактик. Радионаблюдения на длине волны $\lambda = 21$ *см* показывают, что из центра нашей Галактики непрерывно вытекает газ, причем полный поток газа достигает 1 $M_\odot$ в год. Вне плоскости Галактики были обнаружены «убегающие» облака нейтрального водорода. Согласно наблюдениям вокруг ядра Галактики расположена тороидальная область нейтрального водорода диаметром в 6000 световых лет, расширяющаяся со скоростью около 100 *км/сек*. Масса этого образования достигает $2 \cdot 10^5$ $M_\odot$.

С рентгеновскими источниками были отождествлены и некоторые скопления галактик. Суммарная светимость галактик, входящих в состав крупнейших скоплений, по крайней мере на порядок величины меньше наблюдаемой. Дополнительное рентгеновское излучение может быть связано с горячим газом, диффузно распределенным внутри скопления. Детальное обсуждение вопроса о межгалактическом газе в скоплениях галактик будет приведено ниже.

ДИФФУЗНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Дискретные рентгеновские источники расположены на фоне диффузного рентгеновского излучения. Спектр фонового излучения в диапазоне от 1 *кэв* до 1 *Мэв* следует степенно́му закону с изменением показателя спектра в области 20 *кэв*. В диапазоне 1—20 *кэв* спектр относительно плоский, с показателем, равным 1,4. При высоких энергиях фотонов показатель спектра становится равным 2,3. В диапазоне мягкого рентгеновского

*) Приведенная в тексте величина инфракрасной светимости 3С 273 соответствует экстраполяции результатов измерений в диапазоне $\lambda < 10$ *мкм* в область $\lambda \sim 10$ *мкм*. Действительная светимость 3С 273 может быть значительно меньше 10^{48} *эрг/сек*. В наблюдаемом диапазоне ($\lambda < 10$ *мкм*) инфракрасная светимость 3С 273 по порядку величины равна 10^{46} *эрг/сек*. (*Прим. ред.*)

излучения (менее 1 *кэв*) спектр снова становится круче. В связи с этим возникает интересный теоретический вопрос: может ли мягкая компонента фонового рентгеновского излучения представлять собой излучение межгалактического газа?

Фоновое излучение при высоких энергиях больше 20 *кэв* может быть связано с обратным комптоновским рассеянием электронов на 3-градусном реликтовом излучении. Средняя энергия фотонов реликтового излучения близка к 10^{-3} *эв*, и поэтому фотоны, рассеявшиеся на электронах с энергией от 10^6 до 10^8 *эв* *), попадут в область энергий от 10^4 до 10^6 *эв*. Взаимодействие в нормальных галактиках вносит в наблюдаемую интенсивность вклад меньше 1%. Но если релятивистские электроны, образующиеся в радиогалактиках, выходят в межгалактическое пространство, то обратное комптоновское рассеяние на межгалактических космических электронах может привести к достаточно мощному фоновому излучению. Эволюционный фактор, учитывающий вклад источников ранних эпох, повышает эффективность этого процесса. При больших красных смещениях генерация фонового излучения будет проходить более интенсивно, поскольку и плотность энергии реликтового излучения, и мощность источников релятивистских электронов на ранних стадиях эволюции Вселенной значительно превышали современное значение.

Фоновое излучение в области энергий от 1 до 10 *кэв* может быть обусловлено как суммарным излучением дискретных источников, так и «истинно диффузным» рентгеновским излучением, образовавшимся в межгалактическом пространстве. Оценка рентгеновской светимости нашей Галактики лежит в пределах $(2—3)\cdot 10^{39}$ *эрг/сек*, а наблюдаемая светимость туманности Андромеды приблизительно равна $2\cdot 10^{39}$ *эрг/сек*. Однако если мы предположим, что все нормальные галактики имеют одинаковую светимость, и просуммируем их излучение по всей Вселенной, то получим, что суммарная интенсивность излучения от нормальных галактик на 1—2 порядка меньше наблюдаемой.

Не исключено, что средняя светимость нормальных галактик в рентгеновских лучах может определяться молодыми пульсарами. Пульсар NP 0532 в Крабовидной туманности излучает в диапазоне от 1 до 10 *кэв* примерно 10^{36} *эрг/сек*. Предполагая, что этот пульсар является типичным остатком сверхновых, вспыхивающих в нормальной галактике примерно один раз в 100 лет, мы можем определить усредненную по времени светимость галактики. Если начальная кинетическая энергия вращения пульсара равна 10^{52} *эрг*, а эффективность преобразования энергии вращения в энергию рентгеновского излучения составляет 1%, то полное энерговыделение в рентгеновском диапазоне за время жизни пульсара составит 10^{50} *эрг*. При этом усредненная по времени светимость галактики будет равняться примерно 10^{41} *эрг/сек* и суммарная интенсивность излучения всех галактик станет достаточна для объяснения фонового рентгеновского излучения в диапазоне 1—10 *кэв*. Справедливость этой прикидки зависит от точности оценки начальной кинетической энергии вращения пульсара. Предсказания различных теорий колеблются от $3\cdot 10^{49}$ до 10^{53} *эрг*. До сих пор были получены лишь верхние пределы на интенсивность рентгеновского излучения сверхновых, вспыхивающих в удаленных галактиках. Эти пределы соответствуют значениям начальной кинетической энергии вращения пульсара порядка 10^{50}—10^{51} *эрг*.

---

*) Границы диапазона энергий электронов, генерирующих фоновое рентгеновское излучение в обратном комптон-эффекте на реликтовом излучении, указаны неверно: вместо 10^6 и 10^8 *эв* следует читать 10^9 и 10^{10} *эв*. (*Прим. ред.*)

Если вклад нормальных галактик окажется недостаточным для объяснения наблюдаемой интенсивности фонового излучения, то следующим шагом должна стать оценка вклада радиогалактик, сейфертовских галактик и квазаров. Принимая квазар 3C 273 с рентгеновской светимостью 10^{46} *эрг/сек* за типичный квазар, мы получим величину интенсивности фонового излучения, значительно бóльшую наблюдаемой. Такой же результат будет получен, если мы посчитаем NGC 1275 типичной сейфертовской галактикой. Однако известно, что интенсивность рентгеновского излучения сейфертовской галактики NGC 1068, инфракрасная светимость которой сравнима со светимостью NGC 1275, по крайней мере на порядок величины ниже, чем у NGC 1275. Число наблюдаемых источников пока явно недостаточно для того, чтобы образовать базу для статистических оценок. Возможно, что обнаруженные до сих пор в рентгеновском диапазоне активные галактики не являются типичными представителями своих классов.

Как отмечалось выше, интенсивность рентгеновского излучения таких известных скоплений галактик, как скопления в Деве, Персее и Волосах Вероники, на один-два порядка величины превышает ожидаемое значение суммарной интенсивности нормальных галактик в скоплениях. До сих пор не ясно, чем вызывается рентгеновское излучение скоплений: либо одной или двумя мощными радиогалактиками, либо горячим межгалактическим газом, либо каким-то другим источником. Мы пока не имеем информации, достаточной для того, чтобы надежно оценить вклад скоплений в диффузное излучение.

ОЧЕНЬ МЯГКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ФОНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

К результатам наблюдений очень мягких рентгеновских лучей, исключительно сложных с экспериментальной точки зрения, следует относиться с осторожностью. Тем не менее из многочисленных экспериментов на ракетах можно сделать вывод о том, что интенсивность мягких рентгеновских лучей значительно превышает величину, полученную при экстраполяции спектра из области высоких энергий. Обзоры всей небесной сферы, от плоскости Галактики до галактических полюсов, были интерпретированы в двухкомпонентной модели рентгеновских источников. В этой модели поток фонового рентгеновского излучения делится на две части: 1) изотропный внегалактический поток, максимальный вблизи полюсов и постепенно уменьшающийся при приближении луча зрения к плоскости Галактики из-за поглощения в межзвездном газе, и 2) поток излучения от галактических источников мягкого рентгена, распределение которых в объеме Галактики подобно распределению межзвездного газа. Было обнаружено несколько таких источников, среди них можно отметить так называемую Петлю в Лебеде. Эта туманность представляет собой расширяющийся клочковатый фронт старого остатка сверхновой. В ударной волне, сопровождающей столкновение фрагментов расширяющейся оболочки с межзвездным газом, вещество прогревается до нескольких миллионов градусов и излучает мягкое рентгеновское излучение.

Если мы допустим существование внегалактических мягких рентгеновских лучей, то одной из возможных причин их образования может быть тормозное излучение межгалактического газа с температурой порядка миллиона градусов. Концентрация межгалактического газа, необходимая для объяснения наблюдаемой интенсивности, приближенно равна 10^{-5} *см*$^{-3}$, что является минимальной концентрацией, необходимой для того, чтобы Вселенная была «закрытой». Но если мы предположим, что газ сосредоточен в скоплениях галактик, то необходимая величина плот-

ности, усредненная по всему объему Вселенной, уменьшится на порядок величины, поскольку рентгеновская светимость единицы объема излучающего газа пропорциональна квадрату концентрации протонов. Поэтому определение количества газа в ближайших наблюдаемых скоплениях становится очень важной задачей.

Скопления галактик должны сильно притягивать окружающий межгалактический газ, который, если его температура по порядку величины не превышает нескольких миллионов градусов, будет медленно опускаться во внутреннюю область скопления. По оценке времени жизни скопления и скорости аккреции межгалактического газа можно определить полную концентрацию выпавшего газа. Следовательно, ожидаемая интенсивность рентгеновского излучения должна быть связана с плотностью межгалактического газа. Если приписать недавно обнаруженное рентгеновское излучение от скопления в Волосах Вероники тормозному излучению горячего газа, то плотность окружающего газа, определенная по полной массе газа в скоплении, будет очень мала, много меньше критической плотности.

СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК

До сих пор мы рассматривали вопрос о роли межгалактического газа в процессе расширения Вселенной. Однако проблемы «гравитационного самозамыкания» возникают и при изучении скоплений. Так же как и во Вселенной в целом, наблюдаемая масса галактик скопления, как правило, составляет не более нескольких процентов массы, необходимой для удержания галактик собственным гравитационным полем скопления.

Отдельные скопления содержат сотни и тысячи галактик. Число галактик в самых богатых скоплениях достигает десятков тысяч. Кроме того, скопления могут собираться в сверхскопления, содержащие до сотни скоплений. Плотность галактик в центре скопления может превышать среднюю плотность галактик окружающего фона в 10^3—10^6 раз. Некоторые скопления (например, скопление в Волосах Вероники) сферически-симметричны, компактны, проявляют заметное увеличение концентрации галактик к центру и кажутся сильно связанными. Другие скопления (такие как скопление в Персее) нерегулярны, содержат цепочки ярких галактик. Дисперсия скоростей галактик в скоплении Персея очень велика, и не исключено, что полная энергия скопления положительна и оно нестабильно.

Если скопление в Волосах Вероники устойчиво, то согласно теореме вириала гравитационная энергия скопления должна быть вдвое больше суммы кинетической энергии всех галактик. Масса скопления, определяемая из теоремы вириала, много раз больше массы, рассчитанной по наиболее вероятному значению отношения массы и светимости галактик. По оценкам, наблюдаемая масса скопления в 3—7 раз меньше массы обеспечивающей стабильность скопления. Возможны следующие альтернативы: либо недостающая масса содержится в невидимом газе (или в «черных дырах»), либо скопление неустойчиво и разлетается.

Если недостающая масса присутствует в форме газа, то его температура не должна превышать температуры 10^8 °K, соответствующей скорости убегания газа. Нижний предел температуры газа, равный $3 \cdot 10^4$ °K, определяется по отсутствию излучения нейтрального водорода с длиною волны 21 *см*. Наблюдаемое рентгеновское излучение скопления в Волосах Вероники в диапазоне 2—10 *кэв* можно отождествить с тепловым излучением газа с температурой $7 \cdot 10^7$ °K, однако в этом случае масса излучающего газа не превысит 2% массы, необходимой для стабилизации скопле-

ния. Возникает вопрос: не может ли недостающая масса газа находиться при низкой температуре? Исходя из результатов ракетных наблюдений, можно исключить возможность того, что масса газа, стабилизирующего скопление, находится при температуре больше $5 \cdot 10^5$ °К. Однако возможно, что межгалактический газ, с температурой порядка 10^6 °К, падая в скопление, сжимается в облака с температурой от 10^4 до 10^6 °К. Столкновения облаков прогревают малую долю газа до $7 \cdot 10^7$ °К. Присутствие облачной структуры можно обнаружить по излучению в линии L_α (1216 А), сопровождающему рекомбинацию протонов и электронов. Согласно наблюдениям излучения скопления в линии L_α облака, в которых содержится стабилизирующая скопление масса газа, не могут занимать более 6% объема скопления, а температура газа в облаках должна лежать в узком интервале вблизи $2 \cdot 10^5$ °К *).

ВЕЩЕСТВО И АНТИВЕЩЕСТВО

По современной теории поля каждой частице соответствует античастица с той же самой массой, но с противоположными по знаку значениями электрического или барионного зарядов, странности и других квантовых чисел. В то время как на ускорителях частиц высоких энергий, наряду с обычными частицами, образуется заметное число античастиц, мы до сих пор не сумели обнаружить присутствия антивещества во Вселенной в целом. Однако если Вселенная была бы симметрична по отношению к веществу и антивеществу, следствия того легко были бы обнаружены астрономией высоких энергий, несмотря на то, что для обычной оптической астрономии галактики из вещества и антивещества неразличимы.

Эксперименты по регистрации античастиц в составе космических лучей до сих пор не привели к положительным результатам. Полученные в них верхние пределы на содержание античастиц очень малы, порядка десятых или сотых долей процента. Если все космические лучи, наблюдаемые вблизи Земли, являются галактическими, то мы можем заключить, что доля антивещества в Галактике незначительна. Если мы полагаем, что наблюдаемые космические лучи имеют внегалактическое происхождение, то мы приходим к выводу, что Вселенная в целом зарядово несимметрична. В связи с тем, что доля внегалактических космических лучей может быть невелика (порядка 10^{-2}—10^{-3} от полного числа частиц космических лучей), следует считать исключительно важной задачей постановку экспериментов, обеспечивающих выделение малого потока античастиц на фоне обычных частиц, особенно в диапазоне высоких энергий больше 10^{15} *эв*, где вероятность встретить внегалактическую частицу значительно повышается. Весьма важным является и поиск тяжелых антиядер (группы железа). Наблюдение подобных ядер явилось бы веским доказательством существования антивещества в удаленных областях Вселенной, поскольку вероятность рождения ядер антижелеза при столкновениях космических частиц с газом исключительно мала **).

Аннигиляция нуклонов и антинуклонов сопровождается рождением 5—6 π-мезонов, среди которых положительные, отрицательные и нейтральные частицы образуются примерно в равных количествах. Нейтральные π-мезоны распадаются на два γ-кванта, энергетический спектр кото-

---

*) Последние наблюдения скопления в Волосах Вероники в линии L_α окончательно опровергли гипотезу о том, что «недостающая масса» скопления находится в форме межгалактического газа. (*Прим. ред.*)

**) Это утверждение с равным успехом относится и к регистрации любого антиядра, в том числе и антигелия. (*Прим. ред.*)

рых простирается от нескольких десятков до сотен *Мэв* с максимумом в районе 70 *Мэв*. Заряженные мезоны распадаются на нейтрино и мюоны, которые в свою очередь распадаются на нейтрино и электроны (или позитроны). Магнитные поля не позволяют электронам и позитронам уйти далеко от источника, да и при отсутствии магнитных полей комптоновское рассеяние на 3-градусном реликтовом излучении приводит к быстрой потере энергии *). Однако γ-лучи и нейтрино могут приходить на Землю из весьма отдаленных областей Вселенной.

Наблюдения космических γ-лучей со спутника OSO-3 указали на присутствие изотропного фонового γ-излучения. Если предположить, что все наблюдаемые γ-лучи образовались в процессе аннигиляции, то из значения наблюдаемой интенсивности фонового γ-излучения можно получить верхний предел на скорость аннигиляции в межгалактическом пространстве. Изотропия фона может быть обусловлена тем, что γ-лучи образуются либо в однородной межгалактической среде, либо во множестве дискретных источников, равномерно распределенных во Вселенной. Если межгалактический газ состоит из нейтрального водорода, то отсутствие поглощения излучения удаленных квазаров в линии L_α показывает, что концентрация атомов нейтральных атомов в газе не должна превышать 10^{-11} *см*$^{-3}$. При этом интенсивность аннигиляционного γ-излучения равномерно перемешанного газа не будет превышать наблюдаемого значения. Но межгалактический газ может находиться и в полностью ионизованном состоянии с температурой порядка миллиона градусов и выше. Если предположить, что образование галактик не потребовало использования всего газа во Вселенной и масса оставшегося газа сравнима с массой галактического вещества, то концентрация частиц газа должна равняться 10^{-7} *см*$^{-3}$, что в сто раз меньше критической концентрации. Однако ограничение, устанавливаемое наблюдаемой интенсивностью изотропного фонового γ-излучения на концентрацию равномерно перемешанного газа нуклонов и антинуклонов, требует, чтобы концентрация частиц не превышала $3\cdot10^{-10}$ *см*$^{-3}$. Если же газ с концентрацией частиц порядка 10^{-7} *см*$^{-3}$ состоит в основном из нуклонов, то доля антинуклонов не должна превышать 10^{-5}. Следовательно, мы должны заключить, что либо межгалактический газ зарядов несимметричен, либо газа практически нет (его концентрация меньше или порядка 10^{-10} *см*$^{-3}$).

Эксперименты на ИСЗ и высотных аэростатах позволили обнаружить поток γ-лучей от плоскости Галактики. Наблюдаемая картина излучения соответствует наличию линейного источника в галактической плоскости с повышенной интенсивностью излучения в области центра Галактики. Ситуация с галактическим излучением пока остается не определенной, поскольку в результате последних наблюдений с высотных аэростатов были обнаружены лишь дискретные источники γ-излучения. Практически все излучение, выходящее из плоскости Галактики, может быть объяснено процессами столкновения космических лучей с межзвездным газом, приводящими к образованию нейтральных π-мезонов, распадающихся на на γ-кванты **). Мы вынуждены заключить, что наблюдения галактического γ-излучения противоречат присутствию заметных количеств антивещества в Галактике. Если вещество равномерно перемешано с межзвезд-

*) Это не совсем так, поскольку пробег электронов с энергиями порядка десятков *Мэв* относительно энергетических потерь на реликтовом излучении превышает хаббловский радиус Вселенной. (*Прим. ред.*)

**) Вопрос о генерации γ-излучения при взаимодействии космических лучей с газом и другие вопросы наблюдательной γ-астрономии подробно рассматривается в статье А. М. Гальпера, В. Г. Кириллова-Угрюмова и Б. И. Лучкова, помещенной в этом же выпуске УФН. (*Прим. ред.*)

ным газом, то концентрация антинуклонов должна быть по крайней мере в 10^{15} раз меньше концентрации нуклонов.

Аннигиляция вещества и антивещества часто рассматривалась в качестве возможного источника гигантской энергии, излучаемой радиогалактиками, квазарами и сейфертовскими галактиками. В этом случае синхротронное излучение радиогалактик должно возникать при движении образующихся при аннигиляции электронов и позитронов в магнитном поле. К этим частицам переходит около 17% энергии, выделяющейся при аннигиляции; в то же время выделение одного эрга аннигиляционной энергии сопровождается образованием 10^4 γ-квантов от π-распада. Поэтому радиоисточники должны были бы испускать интенсивные потоки γ-квантов, но до сих пор таких дискретных источников γ-квантов обнаружить не удалось. В частности, верхний предел интенсивности NGC 1275 (Персей А) в γ-лучах указывает, что мощность аннигиляционного энерговыделения не должна превышать $5 \cdot 10^{44}$ *эрг/сек*, в то время как рентгеновская светимость этого источника достигает $4 \cdot 10^{45}$ *эрг/сек*, а инфракрасная — $3 \cdot 10^{46}$ *эрг/сек*. Для квазара 3С 273 верхний предел аннигиляционного энерговыделения равен 10^{47} *эрг/сек*, а оцениваемая инфракрасная светимость составляет $6 \cdot 10^{48}$ *эрг/сек*. Мы снова должны сделать вывод о том, что отсутствие сильных внегалактических источников γ-излучения не позволяет считать аннигиляцию вещества и антивещества источником энергии мощных радио-, рентгеновских и инфракрасных галактик. Если бы сильное инфракрасное излучение из центра нашей Галактики возникало в результате аннигиляции, то сопутствующий поток γ-лучей должен был бы в тысячу раз превышать наблюдаемый.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возникновение рентгеновской астрономии, γ-астрономии и астрономии космических лучей оказало существенное влияние на развитие астрофизики. Все новые и неожиданные открытия были получены на приборах первого поколения. Сейчас готовятся новые инструменты, характеристики которых намного лучше, и перспективы для значительных достижений в открытии и объяснении новых явлений великолепны. Мы сможем поставить вопросы, касающиеся основных концепций структуры Вселенной: «Закрыта» она или «открыта»? Как развиваются галактики? Конденсируются ли они из межгалактического газа? Существует ли межгалактический газ вообще? Развиваются ли галактики из активных ядер? Создаются ли скопления галактик из первичной материи? Современная революция в астрономии и технологические достижения в завоевании космоса позволяют надеяться, что эти загадки Вселенной будут разгаданы.

К проблемам астрофизики и космологии никогда не пропадал интерес ученых, они всегда пленяли воображение людей. Прекрасным отражением этого являются слова Анри Пуанкаре (1903 г.): «Астрономия полезна, поскольку она может возвысить нас над самими собой; она полезна, потому что она величественна... она показывает, как ничтожен человек и как велик его разум. Ум человеческий способен заключить в себе всю ослепительную необъятность Вселенной, где тело человека — всего лишь незаметная точка, и наслаждаться ее безмолвной гармонией. Так мы приобретаем способность познать самих себя, способность неоценимую, поскольку именно она определяет величие человека».