

КОСМИЧЕСКИЕ ПОЗИТРОНЫ



А.М. БЫКОВ,

доктор физико-математических наук
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

DOI: 10.7868/S0044394819030034

Статья посвящена исследованию одной из интереснейших задач астрофизики высоких энергий – проблемы происхождения и эволюции космических позитронов. Приведены результаты прямых и косвенных наблюдений космических позитронов на внеатмосферных космических аппаратах. Обсуждаются основные возможные источники позитронов, связанные с распадом нестабильных ядер, произведенных в процессах синтеза химических элементов в звездах; с рождением электрон-позитронных пар в магнитосферах пульсаров и с неупругими взаимодействиями космических лучей с межзвездной средой. Позитроны могут быть продуктами аннигиляции и взаимодействий гипотетических частиц темной материи, и поэтому наблюдения космических позитронов используют для выбора возможных моделей темной материи.

ОТКРЫТИЕ ПОЗИТРОНА

Построение релятивистской квантовой теории электрона в 1928 г. привело Поля Дирака к элегантной гипотезе о существовании положительно заряженной частицы с массой электрона и спином $1/2$, являющейся античастицей по отношению к электрону. Позднее ее назвали позитроном. В 1920-х годах в ленинградском Физтехе с по-

мощью камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле, Д.В. Скобельцын уже проводил исследования ливней частиц, порожденных в атмосфере космическими лучами, а в 1932 г. Карл Андерсон в эксперименте с камерой Вильсона открыл частицу, имевшую массу электрона, но отличающуюся от него противоположным направлением вращения в магнитном поле и, следовательно, имевшую положительный

заряд. Это было блестящим подтверждением теории Дирака и экспериментальным открытием позитрона – первой античастицы. В 1936 г. Андерсону была присуждена Нобелевская премия по физике (одновременно с Виктором Гессом, открывшим космические лучи в 1912 г.). Сегодня процессы рождения позитронов в неупругих столкновениях ускоренных частиц и взаимодействие позитронов со средой изучаются в наземных ускорителях и коллайдерах, но роль космических позитронов по-прежнему очень существенна для понимания природы астрофизических объектов и проверки различных моделей темной материи. Об этой важной их роли и пойдет речь.

Наблюдаемое сегодня глобальное преобладание вещества над антивеществом, а также наблюдаемое малое (порядка 10^{-9}) значение отношения плотности барионов к плотности фотонов связывают с малой асимметрией барионов и антибарионов в ранней Вселенной. В космологических моделях данная асимметрия обусловлена некоторыми различиями в законах взаимодействия частиц и античастиц, что находит подтверждение в лабораторных экспериментах. Эта идея, высказанная академиком А.Д. Сахаровым в 1967 г. в статье под названием “Нарушение CP-инвариантности. C-асимметрия и барионная асимметрия Вселенной”, нашла развитие в ряде современных теорий. Поскольку позитроны имеют вторичное происхождение, они могут быть использованы для диагностики различных фундаментальных физических процессов, в том числе для поиска продуктов взаимодействия частиц темной материи.

Источниками позитронов на Земле, помимо галактических космических ливней в атмосфере и ускорителей релятивистских частиц, являются распады радиоактивных ядер

Источниками позитронов на Земле, помимо галактических космических ливней в атмосфере (вызванных потоками космических лучей) и ускорителей релятивистских частиц, являются распады радиоактивных ядер. В 1934 г. в лабораторных экспериментах О. Клемперера и Дж. Чедвика (Великобритания) были впервые зарегистрированы гамма-кванты с характерной энергией 511 кэВ, свидетельствовавшие об аннигиляции позитронов и электронов. Реакция аннигиляции позитронов и электронов имеет несколько возможных каналов, вероятности реализации которых зависят от энергии позитронов и свойств мишени. Эти обстоятельства, как мы увидим ниже, весьма существенны для поиска аннигиляционного излучения космических объектов.

АННИГИЛЯЦИОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ГАЛАКТИКИ

В начале 1970-х годов в результате первых запусков высотных баллонов с гамма-детекторами на основе кристаллов NaI было обнаружено интенсивное гамма-излучение, исходящее из внутренней области Галактики с энергиями фотонов в некотором интервале около 470 кэВ (что заметно ниже энергии 511 кэВ, соответствующей энергии покоя аннигилирующих электронов и позитронов). Поэтому интерпретация гамма-квантов, детектированных в первых экспериментах, была неоднозначной. В дальнейшем выяснилось, что энергетическое разрешение детекторов NaI не позволяет выделить узкую линию 511 кэВ из более широкого непрерывного спектра, связанного с аннигиляцией позитрония.

Международная гамма-обсерватория ИНТЕГРАЛ (INTEGRAL). Изображение выполнено ESA.



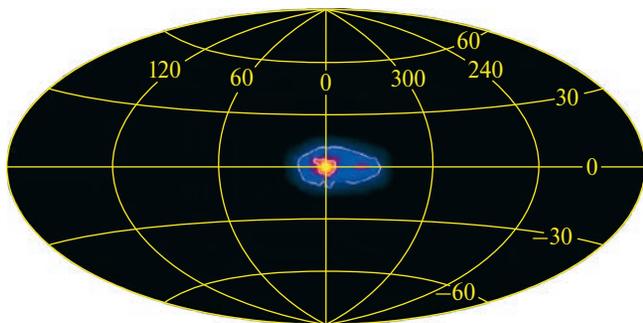
Позитронием называется связанное состояние электрона и позитрона – подобное атому водорода, но с позитроном вместо протона. Энергия связи позитрония в два раза меньше энергии связи атома водорода. Поэтому формирование позитрония в значительных количествах возможно только после охлаждения позитронов в достаточно холодной межзвездной среде. Существует две основные конфигурации позитрония: орто- (с параллельными спинами электрона и позитрона) и парапозитроний (если эти спины антипараллельны). Позитроний, в отличие от атома водорода, быстро аннигилирует, поскольку высока вероятность одновременного нахождения частиц в очень малой окрестности друг друга. Парапозитроний за время порядка 10^{-10} саннигилирует в два гамма-кванта, с образованием узкой линии около 511 кэВ. Аннигиляция ортопозитрония происходит за время около 10^{-7} с и сопровождается, в основном, излучением трех гамма-квантов, формирующих непрерывный спектр, с существенной долей фотонов с энергиями ниже 511 кэВ. Совокупность этих процессов формирует спектр излучения аннигиляции позитрония, заметно отличающийся от узкой линии с энергией 511 кэВ.

Для разрешения отдельных спектральных компонент аннигиляционного излучения используются германиевые детекторы, обладающие хорошим энергетическим разрешением. В частности, гамма-спектрометр SPI на борту

международной гамма-обсерватории ИНТЕГРАЛ (INTEGRAL – International Gamma Ray Astrophysics Laboratory) имеет энергетическое разрешение около 2 кэВ на энергии 1,3 МэВ.

Эта обсерватория была построена в рамках проекта Европейского космического агентства (ESA) с участием Российской академии наук и NASA и выведена на орбиту при помощи ракеты-носителя “Протон” 17 октября 2002 г. с космодрома Байконур. Вот уже более 16 лет обсерватория надежно работает, и с нее продолжают поступать уникальные научные данные.

Длительные наблюдения Галактики с помощью гамма-обсерватории INTEGRAL и обсерватории им. А. Комптона (до 2000 г.) позволили построить карты Галактики в гамма-линиях радиоактивных элементов ^{26}Al , ^{60}Fe и в аннигиляционной линии 511 кэВ. Карта Галактики в линии 511 кэВ (с учетом континуума от аннигиляции ортопозитрония), построенная Г. Вейденспойнтнером и др. (2006) на основе этих наблюдений, приведена на рисунке. Наблюдаемый поток излучения в аннигиляционной линии составляет порядка 10^{-3} фотонов/см²/с, что указывает на скорость аннигиляции позитронов порядка $2 \cdot 10^{45}$ событий в секунду



Карта Галактики в гамма-лучах с энергией около 511 кэВ, соответствующей аннигиляции позитронов и электронов в межзвездной среде. Построена по данным наблюдений, выполненных с помощью международной орбитальной гамма-обсерватории ИНТЕГРАЛ. (ESA/Integral/MPE/G. Weidenspointner и др.)

(в предположении, что источник основной доли фотонов находится на расстоянии около 8 кпк).

Если наблюдаемое аннигиляционное излучение квазистационарно, то в центральной части Галактики должны быть объекты, суммарно производящие порядка $2 \cdot 10^{43}$ позитронов в секунду. Построение карты аннигиляционного излучения Галактики с более высоким пространственным разрешением позволит в будущем установить природу этих источников и механизмы рождения позитронов в них.

Природа космических источников позитронов может быть весьма различной. Позитроны могут рождаться при распаде нестабильных изотопов химических элементов, синтезированных звездами, при неупругих процессах взаимодействия релятивистских частиц, а также при распадах и аннигиляции гипотетических частиц, составляющих темную материю. Некоторые из этих возможностей мы коротко обсудим далее.

Галактические космические лучи имеют широкий спектр энергий, а плотность их энергии, в основном, определяется умеренно релятивистскими ядрами. Поэтому неупругие столкновения космических лучей с межзвездным газом и плотными атмосферами звезд и планет сопровождаются рождением релятивистских позитронов. Позитроны могут иметь ультрарелятивистские энер-

гии, достигающие петаэлектронвольт (10^{15} эВ), чаще всего в окрестности космических ускорителей частиц – таких, как пульсар в Крабовидной туманности. Однако во многих случаях позитроны рождаются с энергиями, близкими к энергии покоя частицы, то есть умеренно релятивистскими.

Такие позитроны образуются, например, в процессе распада неустойчивых изотопов, произведенных при синтезе химических элементов в звездах. В результате мощных вспышек сверхновых и новых звезд, а также посредством звездных ветров молодых массивных звезд синтезированные элементы затем попадают в разреженную межзвездную среду.

ПОЗИТРОНЫ В СВЕРХНОВЫХ ЗВЕЗДАХ

В ходе своей эволюции звезды синтезируют несколько химических элементов, служащих важными источниками позитронов в межзвездной среде: ^{56}Ni , ^{44}Ti и ^{26}Al . В конце жизни, при взрыве сверхновой, звезды “сбрасывают” свои оболочки, содержащие эти элементы, в окружающую среду. Количество “выброшенного” звездой никеля варьируется от ~0,1 массы Солнца (при взрыве, сопровождающем коллапс массивной звезды) до более чем 0,5–0,6 масс

Сверхновая звезда SN 1994D на краю галактики NGC 4526 (в нижнем левом углу). Изображение получено с помощью космического телескопа "Хаббл". (NASA/ESA/Hubble Space Telescope)

Солнца (при взрыве маломассивной звезды – прародителя сверхновой типа Ia).

Так, с помощью гамма-спектрометра SPI на борту обсерватории ИНТЕГРАЛ обнаружены гамма-линии от сверхновой 2014J типа Ia в близкой галактике M82 (в 12 млн св. лет, или в 3,5 млн пк от Земли). Измерение потока гамма-квантов от цепочки распада никеля $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ позволило Е.М. Чуразову, Р.А. Сюняеву и их коллегам (Институт космических исследований РАН) определить, что масса никеля, синтезированного в сверхновой 2014J, составляет $0,6 \pm 0,1$ массы Солнца. Кроме германиевого гамма-спектрометра SPI обсерватория ИНТЕГРАЛ оборудована камерой ISGRI, которая имеет достаточную чувствительность для построения изображений источников жесткого рентгеновского излучения. Детектирование галактического остатка сверхновой Кассиопея А с помощью камеры ISGRI в линиях жесткого рентгеновского излучения позволило М. Рено с коллегами оценить массу радиоактивного ^{44}Tl в оболочке этой сверхновой: она равна $(1,6 + 0,6 - 0,3) \times 10^{-4}$ массы Солнца. Процессы радиоактивного распада никеля и титана – важнейший источник рождения позитронов в межзвездной среде.

Ядра ^{56}Ni , будучи радиоактивными, захватывают электрон и превращаются в ядра радиоактивного ^{56}Co , которые



затем распадаются с образованием стабильного изотопа железа – ^{56}Fe . Реакция распада кобальта в железо идет по нескольким каналам, в том числе с испусканием позитронов. Позитронный канал распада ^{56}Co имеет вероятность примерно 19% и испускает позитроны с непрерывным спектром, до максимальной энергии около 1,45 МэВ, что соответствует умеренно релятивистским скоростям.

Сверхновые типа Ia (их часто называют термоядерными), вероятно, являются продуктом эволюции белых карликов в тесных двойных звездных системах. Это могут быть двойные системы с одним белым карликом, который аккрецирует вещество более массивной звезды-компаньона, или системы с двумя сливающимися белыми карликами. Источник энергии, обеспечивающий очень высокую наблюдаемую светимость сверхновой в первые месяцы после вспышки, – распад синтезированного ^{56}Ni . Распад одной массы Солнца ^{56}Ni , который в конечном итоге превращается в железо ^{56}Fe (по цепочке

распада $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$), согласно расчету Д.К. Надежина, составляет примерно 6×10^{49} эрг от распада ^{56}Ni и $1,3 \times 10^{50}$ эрг от распада ^{56}Co . Это позволяет объяснить энергетику наблюдаемого излучения термоядерных сверхновых. Рассчитанное выделение энергии, а также знание периодов радиоактивного распада этих изотопов позволяют объяснить характерные особенности наблюдаемых кривых блеска некоторых сверхновых. Так, период полураспада ^{56}Ni (около 6 сут) определяет время выхода кривой блеска на пик светимости, а более продолжительный (порядка 77 сут) период полураспада ^{56}Co определяет скорость последующего спада этой кривой. Как уже отмечено выше, цепочка распадов ^{56}Ni сопровождается рождением позитронов, заметная часть которых аннигилирует в оболочке звезды.

Более легкие нестабильные элементы, выброшенные с оболочкой сверхновой (^{44}Ti и ^{26}Al), имеют большие периоды полураспада: порядка 60 лет и 1 млн лет соответственно. (Отметим, что распад ^{44}Ti в ^{44}Ca происходит через промежуточный захват электрона с внутренней электронной оболочки иона ^{44}Ti , и потому время полураспада зависит от ионизационного состояния иона титана и свойств окружающей среды.) Распады ядер с коротким временем жизни (^{56}Ni и ^{44}Ti) происходят в “сброшенной” оболочке сверхновой, тогда как ядра с существенно более долгим временем жизни (^{26}Al и др.) могут распространяться в межзвездной среде на расстояния до 100 пк от источника. Поэтому ядра ^{26}Al служат “распределенными” источниками позитронов в межзвездной среде.

Вспышки сверхновых, сопровождающие коллапс массивных звезд, как правило, оставляют после себя компактный звездный остаток (нейтронную звезду или черную дыру), который, в свою очередь, сам может стать мощным источником позитронов

Несколько отвлекаясь от обсуждения сверхновых звезд как космических источников позитронов, обратим внимание на интересную и не решенную до конца проблему аномально высокого содержания изотопа ^{26}Mg в богатых

кальцием и магнием включениях самого древнего из известных метеоритов – Аленде (Allende). Происхождение этого метеорита, найденного в Мексике, связывают с формированием Солнечной системы, поэтому возраст данных включений, по оценкам, превышает 4,5 млрд лет. Поскольку вероятный источник ^{26}Mg – распад радиоактивного ^{26}Al , то наблюдаемая аномалия содержания изотопа ^{26}Mg

может свидетельствовать о формировании Солнечной системы в облаке межзвездного вещества, обогащенного ^{26}Al благодаря близкой вспышке сверхновой или интенсивному звездному ветру массивной звезды. Вспышки сверхновых, сопровождающие коллапс массивных звезд, как правило, оставляют после себя компактный звездный остаток (нейтронную звезду или черную дыру), который, в свою очередь, сам может стать мощным источником позитронов.

ПОЗИТРОНЫ В РЕЛЯТИВИСТСКИХ ВЕТРАХ ПУЛЬСАРОВ

Важный процесс, отвечающий за образование космических позитронов, – рождение электрон-позитронных пар при движении энергичного фотона (гамма-кванта) в кулоновском поле ядра или в магнитном поле. Сильные электромагнитные поля характерны для окрестности вращающихся

черных дыр и молодых нейтронных звезд-пульсаров с их мощными магнитосферами. Ниже в качестве примера мы рассмотрим источники космических позитронов в окрестностях пульсаров.

Молодые нейтронные звезды обладают сильным магнитным полем (порядка 10^{12} – 10^{15} Гс), они быстро вращаются (с периодом от миллисекунд до нескольких секунд). Сочетание этих свойств приводит к тому, что приходящее на Землю от такой звезды излучение зачастую пульсирует – такую звезду именуют пульсаром. Мощное электрическое поле в приполярной области пульсара способно “вырывать” из поверхности звезды электроны и ускорять их до релятивистских энергий. Релятивистские электроны при движении вдоль искривленных силовых линий магнитного поля приполярных областей излучают энергичные гамма-кванты, способные порождать в этом же самом поле вторичные электрон-позитронные пары. Вторичные электроны и позитроны вновь ускоряются и излучают гамма-кванты, создающие уже новые пары.

Такие каскадные процессы в сильных магнитных полях пульсаров способны порождать до 10^5 электрон-позитронных пар на один “вырванный” из звезды электрон. Образовавшаяся электрон-позитронная плазма заполняет магнитосферу нейтронной звезды и удерживается в ней – в области замкнутых силовых линий магнитного поля. Вращение звезды способствует истечению этой плазмы из магнитосферы в области открытых силовых линий поля. Впоследствии, ускоряясь, эта плазма формирует релятивистский, сильно замагниченный холодный ветер, большая часть энергии которого сосредоточена в эквато-

риальной плоскости вращения нейтронной звезды. Электрон-позитронный ветер может распространяться от нейтронной звезды на расстояния до десятой доли светового года.

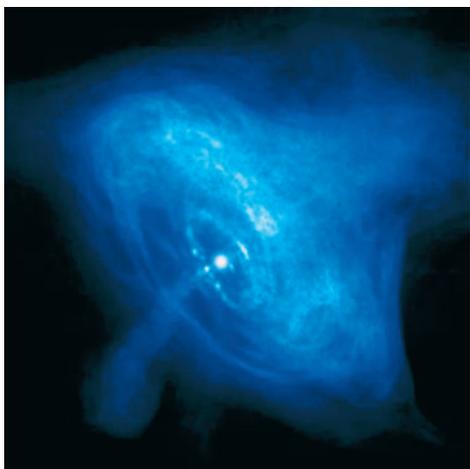
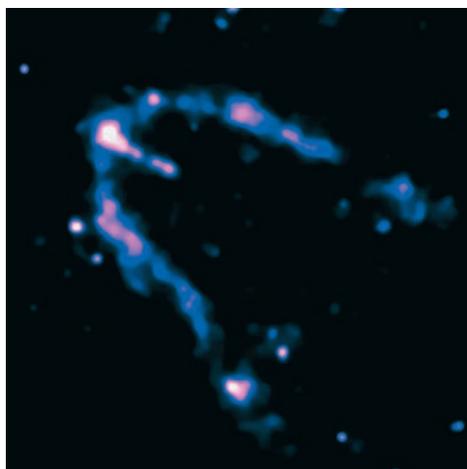
Наиболее изученная нейтронная звезда – пульсар в Крабовидной туманности – имеет период вращения около 33 мс; радионаблюдения позволяют определить скорость замедления этого вращения и тем самым рассчитать потери вращательной энергии пульсара, которые достигают 2×10^{38} эрг/с. Значительная их часть расходуется на формирование релятивистского ветра из электронов и позитронов. Расширяющийся релятивистский ветер пульсара тормозится за счет работы сил давления окружающей среды. Поскольку скорость ветра значительно превышает скорость звука во внешней среде, при торможении ветра образуется ударная волна. Из-за того что большая часть энергии ветра сосредото-

чена около экваториальной области, фронт ударной волны имеет несферическую форму – он сильно выпячен в области экватора и сильно сплюснут у полюсов. В окрестности ударного фронта движение большинства частиц плазмы существенно тормозится, и направления скоростей частиц становятся почти изотропными

(то есть плазма нагревается), при этом некоторая часть электронов и позитронов вовлекается в процессы ускорения до высоких энергий.

В случае Крабовидной туманности эти энергии, вероятно, достигают 10^{15} эВ. Как “нагретые”, так и “ускоренные” электроны и позитроны образуют вокруг породившего их пульсара облако плазмы (саму туманность), в магнитном поле которого они вращаются,

Образовавшаяся электрон-позитронная плазма заполняет магнитосферу нейтронной звезды и удерживается в ней – в области замкнутых силовых линий магнитного поля

а*б*

Синхротронные туманности вокруг пульсаров Краб (слева – фото NASA/CXC/ASU/J.Hester и др.) и пульсар Геминга (справа – фото из “The Astrophysical Journal”, 2017. V. 835, статья 66). Существенные различия в морфологии этих туманностей связаны с тем, что пульсар Геминга движется через межзвездную среду со сверхзвуковой скоростью, что сопровождается формированием головной ударной волны. Рентгеновские изображения получены в диапазоне 0,5–8,0 кэВ с помощью космической обсерватории “Чандра” (NASA)

испускающая синхротронное излучение и постепенно теряя свою энергию. Синхротронные туманности наблюдаются вокруг многих пульсаров, причем зачастую – во всем спектральном диапазоне: от радио- до гамма-излучения.

На рисунке показано изображение Крабовидной туманности в рентгеновских лучах (в диапазоне 0,5–8,0 кэВ), полученное орбитальной рентгеновской обсерваторией “Чандра” (“Chandra”, NASA). Рентгеновские фотоны, формирующие это изображение, испускаются высокоэнергичными электронами и позитронами с характерными энергиями порядка 10^{12} эВ в магнитном поле туманности. На рисунке хорошо различимы структуры, характерные для пульсарных туманностей: яркое кольцо ударной волны остановки ветра; тор, образованный экваториальным истечением ветра; узкие струйные выбросы (джеты) вдоль оси симметрии туманности, свя-

занные с “фокусировкой” приосевых плазменных потоков сильным тороидальным магнитным полем туманности.

Так как взрыв сверхновой звезды может быть асимметричным и сопровождается анизотропным разлетом вещества, рождаемый при взрыве пульсар может испытать “эффект отдачи” и приобрести заметную собственную скорость относительно межзвездной среды. Эта скорость зачастую превышает скорость звука в среде, и тогда туманность движущегося пульсара формирует головную ударную волну. Изображение туманности Геминга, также полученное в обсерватории “Чандра”, имеет структуру, заметно отличающуюся от Крабовидной туманности. Наличие головной ударной волны может существенно повысить эффективность преобразования энергии пульсарного ветра в электроны и позитроны максимально высоких энергий. Благодаря

этому спектр излучения таких туманностей становится очень жестким (содержит относительно большую долю высокоэнергичных фотонов). Позитроны и электроны сверхвысоких энергий уходят из таких туманностей в межзвездную среду и могут достигать орбиты Земли (если на пути от пульсара к Земле они не успеют потратить значительную долю своей энергии на синхротронное и комптоновское излучение). Поэтому только достаточно близкие пульсары (например, PSR J0437-4715, PSRB0656+14 и пульсар Геминга) могут вносить вклад в потоки позитронов, наблюдаемые на орбите Земли.

В заключение отметим, что коллапс массивной звезды может заканчиваться рождением не только нейтронной звезды, но и черной дыры звездной массы. Если черная дыра рождается в двойной звездной системе в паре с обычной звездой-компаньоном, то она может “перетягивать” на себя вещество этой звезды. Захваченное звездное вещество из-за наличия у него орбитального момента движения находится на близких к черной дыре орбитах, формируя так называемый аккреционный диск. Во многих релятивистских объектах он оказывается ярким источником рентгеновского излучения. В процессе аккреции на черную дыру вдоль оси вращения диска формируются узкие релятивистские истечения в виде струй. Такие истечения (джеты) наблюдаются у ряда звездных источников рентгеновского и гамма-излучения – таких, как SS433 и GRS1915+105. Подобные объекты называют микроквазарами. Процессы в их релятивистских истечениях также могут быть существенными источниками позитронов в межзвездной среде.

Если черная дыра рождается в двойной звездной системе в паре с обычной звездой-компаньоном, то она может “перетягивать” на себя вещество этой звезды

ПОЗИТРОНЫ И АННИГИЛЯЦИЯ ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА

На наличие в космосе темной материи (составляющей, по оценкам, порядка 25% массы Вселенной) указывает ряд наблюдательных фактов. Среди них – особенности радиального распределения скорости вращения вещества в галактиках и аномалии скорости движения самих галактик в массивных скоплениях. Ряд успешных моделей наблюдаемой крупномасштабной структуры Вселенной предполагает наличие во Вселенной холодной темной материи, образованной гипотетическими массивными частицами, слабо взаимодействующими с барионным веществом. Природа этих массивных частиц до сих пор не уста-

новлена, более того, существуют и альтернативные модели темной материи.

Среди альтернатив можно отметить модель темного вещества, образованного аксионами – гипотетическими псевдоскалярными частицами, существование которых предположено в квантовой хромодинамике для решения проблемы отсутствия сильного нарушения зарядовой и пространственной четности в реакциях элементарных частиц. Существуют также модели “квантовой жидкой темной материи” (в англоязычной литературе ее иногда называют *fuzzy dark matter*, то есть “размытая” темная материя). Особенность этого класса моделей состоит в том, что они полагают частицы темной материи сверхлегкими – например, с массой порядка 10^{-22} эВ. Длина волны де Бройля для таких частиц имеет астрономические масштабы, превышающие десятки парсеков. В рамках данной модели можно понять существование

относительно небольшого количества наблюдаемых малых галактик и структуры центральных областей скоплений галактик, но здесь есть и свои трудности.

В качестве гипотетической частицы – кандидата на роль составляющей холодной темной материи – рассматривают суперсимметричную частицу – нейтралينو (χ). Теоретически эта частица должна испытывать только слабые и гравитационные взаимодействия и обладать массой от 30 до 5000 ГэВ. Такой интервал масс позволяет нейтралино иметь нерелятивистские скорости после так называемого “процесса закалки”, происходящего из-за расширения Вселенной – в момент, когда скорость аннигиляции частиц темной материи становится малой. Поэтому нейтралино должны накапливаться в повышенных концентрациях в гравитационно-связанных областях пространства. Частицы нейтралино совпадают со своими античастицами, что позволяет им аннигилировать друг с другом; среди прочих продуктов этой реакции могут рождаться позитроны и нейтрино. Нейтрино могут свидетельствовать об аннигиляции нейтралино в центральных областях звезд и в других плотных космических объектах, поскольку для нейтрино плотное вещество почти прозрачно (еще одним свидетельством может служить дополнительный нагрев этих объектов). Ожидаемые энергии нейтрино от распада нейтралино составляют примерно одну треть от массы покоя последнего, то есть десятки и сотни гигаэлектронвольт. Позитроны же могут быть использованы для диагностики аннигиляции нейтралино в разреженных областях. В результате анни-

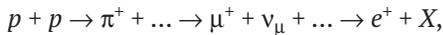
гиляции $\chi + \chi \rightarrow e^+ + X$ (здесь и далее X означает совокупность всех отличных от позитронов продуктов реакции) формируется спектр позитронов с завалом (спадом) при энергиях, находящихся в интервале от половины до трети массы покоя нейтралино. Как мы увидим ниже (см. рисунок) из анализа данных эксперимента, выполняемого с помощью магнитного спектрографа “AMS-02” на Международной космической станции, оценка возможной массы нейтралино составляет порядка 0,5–1,0 ТэВ.

ПОЗИТРОНЫ ОТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДОЙ

Значительное аннигиляционное гамма-излучение Галактики было предсказано на основе предложения академика В.Л. Гинзбурга о поиске продуктов взаимодействия космических лучей с межзвездным газом. Ядерная компонента космических лучей представляет собой высокоэнергичные ядра водорода (протоны) и ядра более тяжелых, чем водород, элементов. Космические лучи с энергиями выше порога рождения пи-мезонов могут порождать вторичные энергичные электроны и позитроны. Средняя плотность энергии ядерной компоненты космических лучей в Галактике составляет около 1 эВ/см^3 и сравнима с плотностью энергий основных компонент межзвездной среды – турбулентных движений межзвездного газа, поля излучения (реликтового, инфракрасного и оптического), магнитного поля, а также с плотностью тепловой энергии межзвездной среды.

Ядерная компонента космических лучей представляет собой высокоэнергичные ядра водорода (протоны) и ядра более тяжелых, чем водород, элементов

Средняя плотность энергии галактических космических лучей определяется в основном протонами с энергиями E порядка гигаэлектронвольтов; однако концентрация последних падает с ростом энергии по степенному закону $E^{-1,7}$ вплоть до энергий порядка 1 ТэВ (где наблюдаются отличия от степенной зависимости). Неупругие столкновения протонов космических лучей с межзвездным газом сопровождаются рождением вторичных позитронов в ходе реакций:



а концентрация вторичных позитронов с энергией больше нескольких гигаэлектронвольт падает с ростом энергии. Модели диффузионного распространения галактических космических лучей также предсказывают падение отношения потока позитронов $F(e^+)$ к суммарному потоку электронов и позитронов $F(e^+) + F(e^-)$ с ростом энергии частиц.

НАБЛЮДЕНИЯ ПОЗИТРОНОВ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Магнитные спектрометры – это основной инструмент, который позволяет отдельно детектировать потоки позитронов и электронов в космических лучах. В 1990-х гг. успешные измерения потоков позитронов до энергий порядка 50 ГэВ были выполнены в баллонных (аэрозольных) экспериментах CAPRICE, HEAT и некоторых других. Последующий вынос спектрометров на орбиту Земли позволил существенно увеличить экспозицию (время накопления данных). Так, магнитный спектрометр PAMELA (Payload for Antimatter Matter

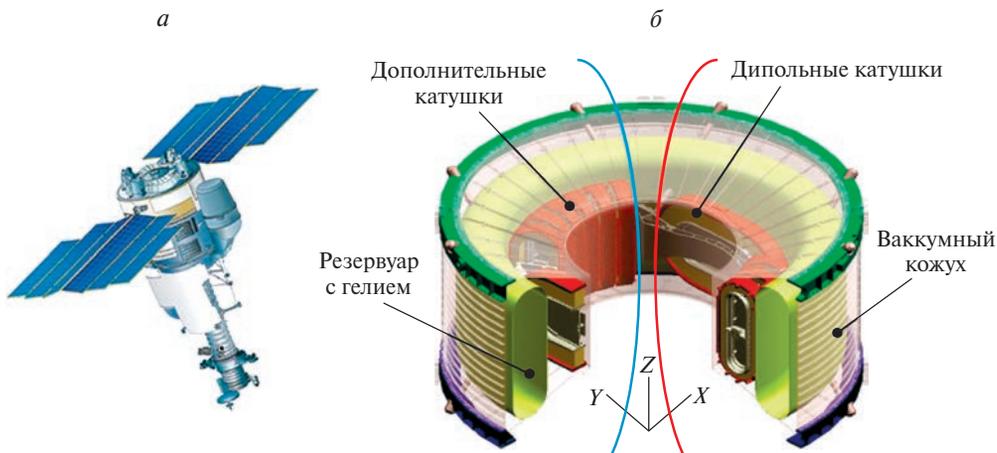
Магнитные спектрометры – это основной инструмент, который позволяет отдельно детектировать потоки позитронов и электронов в космических лучах

Exploration and Light-nuclei Astrophysics) был смонтирован на российском космическом аппарате “Ресурс-ДК” и запущен с космодрома Байконур с помощью ракеты-носителя “Союз”. После запуска 15 июня 2006 г. спектрометр успешно проработал до 7 февраля 2016 г.

С помощью спектрометра PAMELA был измерен поток позитронов с энергиями вплоть до ≈ 270 ГэВ и значимо определена его доля $\eta = F(e^+)/[F(e^+) + F(e^-)]$ в суммарном потоке электронов и позитронов на орбите Земли. Оказалось, что эта доля (η) имеет особенности при определенных энергиях: в частности, она растет вместе с энергией позитронов, начиная с энергии в несколько гигаэлектронвольт. Такое повышение доли позитронов в суммарном потоке несовместимо со стандартными моделями вторичного происхождения позитронной компоненты космических лучей, а именно с ее появлением в результате неупругих столкновений ядерной компоненты космических лучей с межзвездным газом. Таким образом, была открыта перспектива проверки моделей происхождения наблюдаемого на орбите Земли избытка позитронов – создается ли этот избыток конкретными астрофизическими источниками или порождается аннигиляцией частиц темной материи (о них шла речь выше)?

К настоящему времени эффект роста избытка позитронов с ростом их энергий подтвержден и измерен с высокой точностью в интервале от нескольких гигаэлектронвольт до примерно 500 ГэВ. Измерения были выполнены с помощью магнитного спектрометра AMS-02 (Alpha

Magnetic Spectrometer), установленного в 2011 г. на борту Международной космической станции. Сверхпроводящий



Космические магнитные спектрометры: а – PAMELA; б – схема AMS-02, работающего на борту МКС (<http://www.ams02.org/what-is-ams/tecnology/magnet/scmagnet/>). Оба детектора предназначены для прецизионных измерений потоков позитронов и антипротонов в космических лучах

магнит AMS-02 создает магнитное поле свыше 0,8 Тл в центральной области цилиндра, а дополнительные катушки минимизируют магнитное поле вне рабочей зоны. Такое устройство спектрометра (см. рисунок) позволяет редуцировать его полный магнитный момент и тем самым максимально снизить взаимодействие его магнитного поля с магнитным полем Земли с целью исключить механическое воздействие спектрометра на МКС. Для поддержания сверхпроводящего магнита на уровне 1,8 К применяется сверхтекучий гелий. Детекторы, используемые в космических экспериментах PAMELA и AMS-02, имеют калориметры для определения энергии частиц; с их помощью можно определять время пролета частицы. Результаты наблюдений потоков космических позитронов на AMS-02, они позволяют увидеть переход доли позитронов η в режим роста (представлены на рисунке).

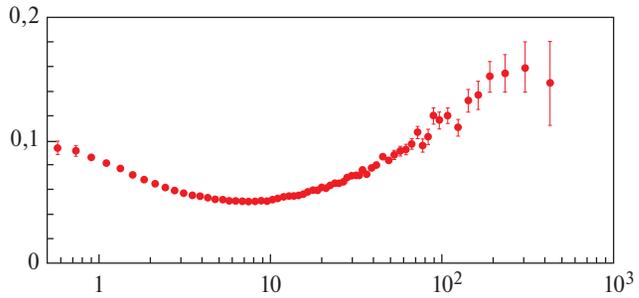
На энергиях выше 500 ГэВ суммарные спектры электронов и позитронов были измерены в 2017 г. по про-

грамме нового международного эксперимента CALET (Calorimetric Electron Telescope) на борту МКС, а также с помощью орбитального детектора DAMPE (Dark Matter Particle Explorer), созданного в Академии наук Китая. Эффективная площадь этих детекторов позволила измерить суммарные потоки и спектры электронов и позитронов до энергий свыше 10 ТэВ. Было обнаружено существенное подавление потока релятивистских лептонов на энергиях около 1 ТэВ. Это указывает на то, что источники лептонов с энергиями ниже 1 ТэВ отличны от источников электронов и позитронов более высоких энергий. В частности, вероятен сценарий, в котором источниками повышенных потоков лептонов на энергиях ниже 1 ТэВ являются синхротронные туманности с головными ударными волнами, сформированные миллисекундными пульсарами в окрестности нескольких сотен парсеков от Солнца.

Результаты вышеперечисленных экспериментов вызывают огромный интерес, поскольку они открывают воз-

возможность количественной проверки как моделей темной материи, так и моделей возможных источников позитронной компоненты космических лучей – пульсарных туманностей, остатков сверхновых звезд и микроквазаров. На настоящий момент однозначно принятой модели происхождения и спектров позитронов в космических лучах нет; тем не менее, в рамках каждой из указанных моделей уже получены важные результаты. В частности, возможными источниками, позволяющими понять наблюдаемые потоки позитронов, могут стать рентгеновские туманности, образованные релятивистскими ветрами старых, миллисекундных пульсаров в окрестности Солнечной системы – таких, как ближайший к Солнцу PSR B0656+14, а также PSR-B0656+14 и пульсар Геминга. При этом интерпретация наблюдений “AMS-02” требует рассмотрения нетривиальных режимов диффузии релятивистских частиц – как вблизи источников позитронов, так и в локальной окрестности Солнечной системы. В рамках моделей формирования спектров позитронов при распаде частиц темной материи получены оценки их массы – порядка 0,5–1 ТэВ.

В этом кратком очерке мы обсудили лишь малую часть вопросов, связанных с космическими позитронами. Продолжающееся накопление данных о них в ходе орбитальных экспериментов AMS-02, CALET и DAMPE в сочетании с разнообразными наблюдениями фотонного излучения от возможных источников позитронов, несомненно,



Доля позитронов – отношение потока позитронов к суммарному потоку электронов и позитронов: $F(e^+)/[F(e^+) + F(e^-)]$ – в космических лучах на орбите Земли как функция энергии частиц в ГэВ, измеренная с помощью магнитного спектрометра “AMS-02” на борту МКС (Aguilar M. et al. // Physical Review Letters, 2014. V. 113 (12). P. 121102)

позволит выделить вклады отдельных космических объектов в наблюдаемые потоки и спектры этих античастиц на орбите Земли. В дополнение к текущим экспериментам разработан перспективный проект орбитального гамма-телескопа для чувствительных наблюдений гамма-излучения от аннигиляции позитронов и электронов в центральной части Галактики и от отдельных астрофизических источников. Этот проект создан в рамках международного консорциума eASTROGAM, в котором участвуют и российские исследователи. Спроектированный телескоп позволит изучать области активного звездообразования, релятивистские истечения в источниках гамма-излучения и их аннигиляционное излучение с применением методов ядерной спектроскопии.