

Космическая обсерватория “Ферми”: шесть лет на орбите

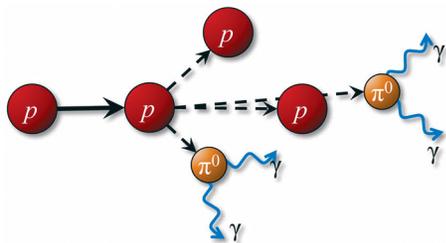
И.В. МОСКАЛЕНКО,
доктор философии
Стэнфордский университет

Шесть лет исследует гамма-излучение Вселенной американская космическая обсерватория “GLAST” (Gamma-ray Large Area Space Telescope – космический широкоугольный гамма-телескоп), названная в честь Энрико Ферми (Земля и Вселенная, 2008, № 5, с. 58). За это время “Ферми” зарегистрировал более 5×10^{11} фотонов с энергией более 20 МэВ. За первые два года наблюдений число обнаруженных источников гамма-излучения увеличилось в 10 раз – почти до 2 тыс., открыты новые типы

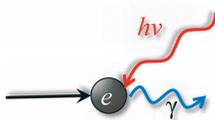


источников, получена уникальная информация об источниках уже известных типов. Благодаря необычному режиму работы обсерватория каждые три часа

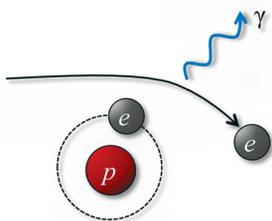
обзоревает все небо. В статье рассказывается об истории гамма-астрономии, о принципах детектирования фотонов наивысших энергий, о гамма-телескопе на обсерватории “Ферми” и основных результатах исследований. Накопленные данные будут исследовать еще не одно поколение астрофизиков. Наблюдения астрофизических источников и космологических процессов во Вселенной с помощью обсерватории “Ферми” продолжатся до 2018 г.



$pp \rightarrow \pi^0(\gamma 2) + X$ – рождение и распад нейтральных пионов



обратное комптоновское рассеяние



тормозное излучение

ГАММА-АСТРОНОМИЯ

Гамма-излучение представляет собой наиболее высокоэнергичную часть электромагнитного спектра. Границы его условно начинаются с 0,5 МэВ (энергия покоя электрона), где заканчивается рентгеновский диапазон, и ничем не ограничены со стороны больших энергий. Как и во всех других диапазонах электромагнитного излучения, в гамма-диапазоне излучение переносят фотоны. Энергия этих фотонов настолько велика, что, сталкиваясь между собой, они могут рождать элементарные частицы, как правило это пары электрон–позитрон. Энергия фотона на нижней границе гам-

ма-диапазона в 500 тыс. раз превышает энергию фотона видимого света, а самые высокоэнергичные фотоны, которые наблюдались с помощью атмосферных черенковских телескопов, имеют энергию, превышающую энергию фотонов видимого света в 10^{14} раз (100 ТэВ).

Гамма-телескопы отличаются от обычных телескопов. Общее у них только название и предназначение – наблюдать электромагнитное излучение от астрономических объектов. Фотоны таких высоких энергий невозможно сфокусировать с помощью линзы или зеркала, так как они не преломляются и не отражаются обычной оптикой. Поэтому использует-

Основные процессы генерации гамма-излучения высоких энергий.

ся метод конверсионной техники: первичный гамма-квант превращают в электрон-позитронную пару, измеряют направления движения частиц и их энергии, а затем восстанавливают направление прихода первоначального фотона. На первых гамма-телескопах для этого использовали искровые камеры. На гамма-телескопе нового поколения, обсерватории “Ферми”, установлены полупроводниковые кремниевые пластины, которые определяют с большой точностью координаты проходящих через них заряженных частиц. Такая же технология применяется и в наземных ускорителях. Энергию фотона измеряют, зная полное энерговыделение порожденного им каскада в калориметре. Чтобы каскад развился и полностью поглотился в инструменте, подбирают соответствующие материалы и конструкцию телескопа.

Гамма-излучение в диапазоне до нескольких МэВ возникает в результате ядерных переходов, радиоактивного распада, аннигиляции электронов и позитронов. Они

дают характерные линии в спектре, что и помогает их идентифицировать. Другие процессы с участием электронов, такие как обратное комптоновское рассеяние, тормозное и синхротронное излучение в сильных магнитных полях, дают непрерывный спектр. В зависимости от энергии электронов тормозное излучение и обратное комптоновское рассеяние способны генерировать фотоны и значительно больших энергий. Также при высоких энергиях рождаются нейтральные пионы и каоны в протон-протонных и протон-ядерных столкновениях. Нейтральные пионы распадаются на два фотона с одинаковой энергией, которые испускаются в противоположные стороны. Если пион движется, что и происходит в реальности, то из-за релятивистских эффектов испущенный вперед фотон в системе наблюдателя обладает более высокой энергией, чем фотон, испущенный назад. Нейтральные каоны тоже распадаются, часто с испусканием одного или более нейтральных пионов, которые, в свою очередь, распадаются с испусканием двух фотонов.

Во всех процессах, приводящих к генерации гамма-излучения с энергиями более 10 МэВ (тормозное излучение, обратное комптоновское рассеяние, рождение и

распад нейтральных пионов), участвуют частицы высоких энергий. Таким образом, регистрация гамма-излучения от астрономических источников позволяет изучать процессы ускорения частиц и их взаимодействие с межзвездным веществом, в том числе в других галактиках.

ИСТОРИЯ ГАММА-АСТРОНОМИИ

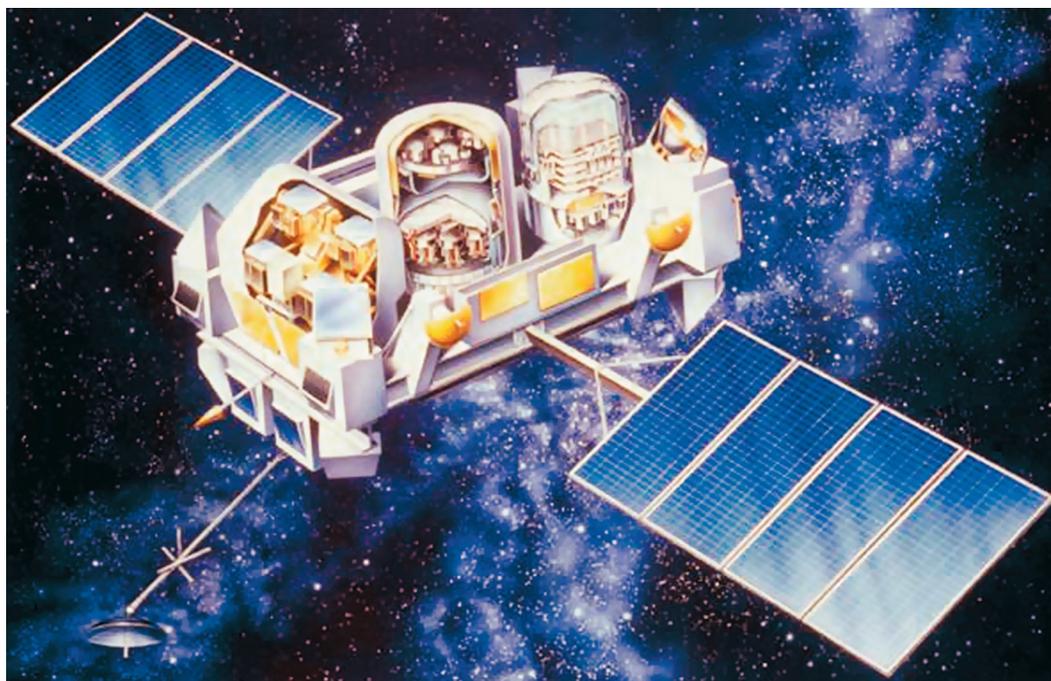
Рентгеновская и гамма-астрономия – две самые молодые области астрономии, возникшие с началом космической эры, однако первые эксперименты были выполнены ранее на стратосферных баллонах (Земля и Вселенная, 2009, № 2; 2014, №№ 5, 6). Атмосфера не пропускает рентгеновское и гамма-излучение, поэтому прямые наблюдения в таких диапазонах невозможны, хотя не прямые наблюдения допустимы при энергии выше 50 ГэВ. Экранирующее свойство атмосферы сохраняет земную биосферу от губительного гамма-излучения.

В начале 1960-х гг. появились первые сообщения о наблюдении гамма-излучения приборами на космических аппаратах. Первые систематические исследования выполнены на американском ИСЗ “OSO-3” (Orbiting Solar Observatory – орбитальная солнечная обсерватория), запущенном

в 1967 г. Обсерватории удалось зафиксировать 621 фотон с энергиями выше 50 МэВ. Несмотря на плохое угловое разрешение – 25° , было обнаружено, что Галактическая плоскость является ярким источником гамма-излучения, был зафиксирован избыток излучения в направлении Галактического центра, а также обнаружено изотропное излучение.

Примерно в это же время группа американских военных спутников “Вела” (“Vela”), предназначенных для контроля за соблюдением СССР договора 1963 г. о частичном запрещении испытаний ядерного оружия, обнаружила всплески гамма-излучения, не имеющие отношения к ядерным взрывам. Эти гамма-всплески стали предметом исследования научной группы, созданной в Лос-Аламосской национальной лаборатории. Анализируя время прихода импульсов, зарегистрированных различными спутниками, удалось установить внеземную природу гамма-всплесков (Земля и Вселенная, 1993, № 2). Теперь известно, что они представляют собой результат мощнейших взрывов в глубинах Вселенной.

В ходе первых экспериментов удалось доказать существование космического гамма-излучения, и целью гамма-



астрономов стало увели-
чение эффективных раз-
меров телескопа и улуч-
шение углового разре-
шения. Первая половина
1970-х гг. ознаменовалась
запусками американско-
го малого астрономиче-
ского спутника “**SAS-2**”
и европейской космиче-
ской гамма-обсерватории
“**COS-B**”. Приборы ИСЗ
“**SAS-2**” зафиксировали
около 8 тыс. фотонов с
энергией выше 30 МэВ.
Исследования подтвер-
дили, что излучение вы-
соких энергий идет от Га-
лактической плоскости и
центра Галактики. Было
открыто гамма-излуче-
ние от пульсаров Краб
(PSR B0531+21), Вела
(PSR B0833-45, или PSR
J0835-4510) и Геминга
(PSR B0630+17; Земля и

Вселенная, 1998, № 6).
Обсерватория “**COS-B**”
проработала на орбите
более семи лет и зафик-
сировала 200 тыс. фото-
нов. Впервые были полу-
чены подробные карты
неба в гамма-диапазоне
300 МэВ – 5 ГэВ и состав-
лен каталог из 25 источ-
ников.

Следующим этапом
стал запуск в 1991 г.
Комптоновской космиче-
ской гамма-обсерватории
“**CGRO**” массой 17 т. На
ее борту находились че-
тыре инструмента – де-
тектор гамма-всплесков
(**BATSE**), ориентиро-
ванный сцинтилляцион-
ный спектрометр
(**OSSE**), комптоновский телескоп
(**COMPTEL**) и гамма-те-
лескоп высоких энергий
(**EGRET**), – работавшие

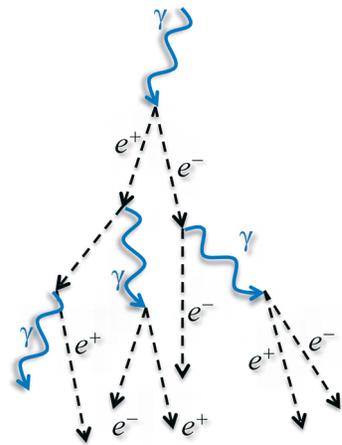
*Комптоновская космиче-
ская гамма-обсерватория
“CGRO”. На ней установ-
лены инструменты: ориен-
тированный сцинтилляци-
онный спектрометр OSSE,
комптоновский телескоп
COMPTEL (в середине) и
энергичный гамма-телескоп
EGRET. По углам распо-
ложены детекторы гамма-
всплесков BATSE. Рисунок
NASA.*

в диапазоне 20 кэВ –
30 ГэВ. Это стало уже
настоящей революци-
ей в гамма-астрономии!
За девять лет исследо-
ваний **BATSE** зарегист-
рировал 8021 вспышку,
в том числе 2704 гам-
ма-всплеска, 1192 сол-
нечные вспышки, 1717
магнитосферных всплес-
ков, 185 мягких гамма-

репитеров (нерегулярно вспыхивающие нейтронные звезды с очень сильным магнитным полем – магнетары) и 2003 других вспыхивающих источника. Прибор OSSE обнаружил интенсивную линию 511 кэВ, соответствующую аннигиляции позитронов, идущую из центральной части Галактики. Результатом исследований COMPTEL стал первый обзор неба в диапазоне 0,8–30 МэВ. В обзор вошли 63 источника, среди них – активные ядра галактик, пульсары, кандидаты в черные дыры, гамма-всплески и остатки сверхновых. Гамма-телескоп EGRET выполнил обзоры неба в нескольких диапазонах энергий и обнаружил 271 источник, включая 70 активных ядер галактик, радио-квазары и блазары, радиогалактику Центавр А (NGC 5128), Большое Магелланово Облако и шесть пульсаров. Не установлена природа 170 источников.

Гамма-излучение с энергиями свыше 50 ГэВ можно наблюдать с поверхности Земли, если использовать метод, основанный на регистрации черенковского излучения, возникающего в результате развития электромагнитного каскада в атмосфере. При взаимодействии с атомным ядром или электроном в верхних слоях атмосферы высокоэнергетический фотон рож-

дает пару электрон–позитрон, которые, в свою очередь, излучают фотоны тормозного излучения. Эти фотоны снова рождают пары, создавая электромагнитный каскад, который развивается до тех пор, пока энергия возникающих в каскаде фотонов не опустится ниже порога образования пар. Каскадные электроны и позитроны со скоростями, превышающими скорость света в среде, в данном случае в воздухе, генерируют черенковское излучение (излучение Вавилова – Черенкова), достигающее поверхности Земли. Вспышки черенковского излучения очень коротки – примерно 5 нс, их интенсивность – всего 50 фотонов/м² в пределах 100 м от оси каскада, максимум приходится на область ультрафиолета. Зафиксировать вспышки можно только в безлунные ночи, для этого нужны большие оптические зеркала. Кроме того, надо уметь отличать электромагнитные каскады от адронных, которых гораздо больше. Наземные гамма-телескопы получили название “атмосферные черенковские телескопы”. Они могут состоять из одного зеркала или быть объединены в группу похожих телескопов, то есть иметь несколько зеркал, одновременно нацеленных на один и тот же участок неба. На-



Электромагнитный ливень в атмосфере, образованный энергичным гамма-квантом.

пример, гамма-телескоп **H.E.S.S.** в Намибии состоит из четырех зеркал диаметром 10 м, расположенных на расстоянии 60 м, его энергетический диапазон – 100 ГэВ – 100 ТэВ. Совсем недавно появились и водяные черенковские телескопы, которые состоят из множества огромных водяных баков с фотоумножителями внутри. При этом каскад, начавшийся у границы атмосферы, продолжает развиваться в воде внутри баков, где и регистрируется фотоумножителями. К последним относятся телескопы **Milagro** в штате Нью-Мексико, США (Земля и Вселенная, 1994, № 5, с. 50) и **HAWK** (Высокогорная водяная черенковская гамма-об-



серватория) в Мексике, построенная с применением опыта использования Milagro. Все черенковские телескопы для наблюдения гамма-излучения помещают высоко в горах. Детекторы черенковского излучения используются и в других видах телескопов, таких как подземные нейтринные телескопы в США, Канаде, Японии и в самом большом ледяном нейтринном телескопе **IceCube** (США) объемом 1 м^3 , расположенном под антарктическим льдом на глубине 1,5 км на Южном полюсе. С конца 1970-х гг. такие детекторы регистрируют ча-

стицы высоких энергий в Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН (Земля и Вселенная, 2011, № 1). Похожим образом работают и подводные нейтринные телескопы, например НТ-200 в озере Байкал (Россия) и Antares в Средиземном море (Франция).

В настоящий момент только с помощью черенковских телескопов (атмосферных и водяных) можно наблюдать гамма-излучение в диапазоне более 10^{12} эВ. Атмосферные черенковские телескопы обладают хорошим угловым разрешением, обычно лучше $0,1^\circ$.

Антенна диаметром 10 м на одном из четырех идентичных атмосферных черенковских телескопов H.E.S.S. в Намибии. Фото H.E.S.S.

Но их поле зрения невелико, всего несколько градусов, энергетическое разрешение — 30–40% для отдельного зеркала и 10–15% — для группы телескопов. Водяные черенковские телескопы позволяют вести круглосуточные наблюдения, их поле зрения практически охватывает все небо над установкой, угловое разрешение приближается к $0,1^\circ$ при энергиях более 10 ТэВ (HAWK), а энер-

гетическое разрешение в этом диапазоне не превышает 50%. Водяные черенковские телескопы создают серьезную конкуренцию атмосферным телескопам.

ОБСЕРВАТОРИЯ «ФЕРМИ»

Космическая гамма-обсерватория **“GLAST”** была запущена 11 июня 2008 г. на круговую околоземную орбиту высотой 565 км, наклоном 25,58° и периодом обращения 95,6 мин. Вскоре после запуска она получила название **“Ферми”**

Высокогорный водный черенковский телескоп HAWK в Мексике площадью 150 м². Он состоит из 300 огромных баков с водой и фотоумножителями внутри. Фото HAWK.

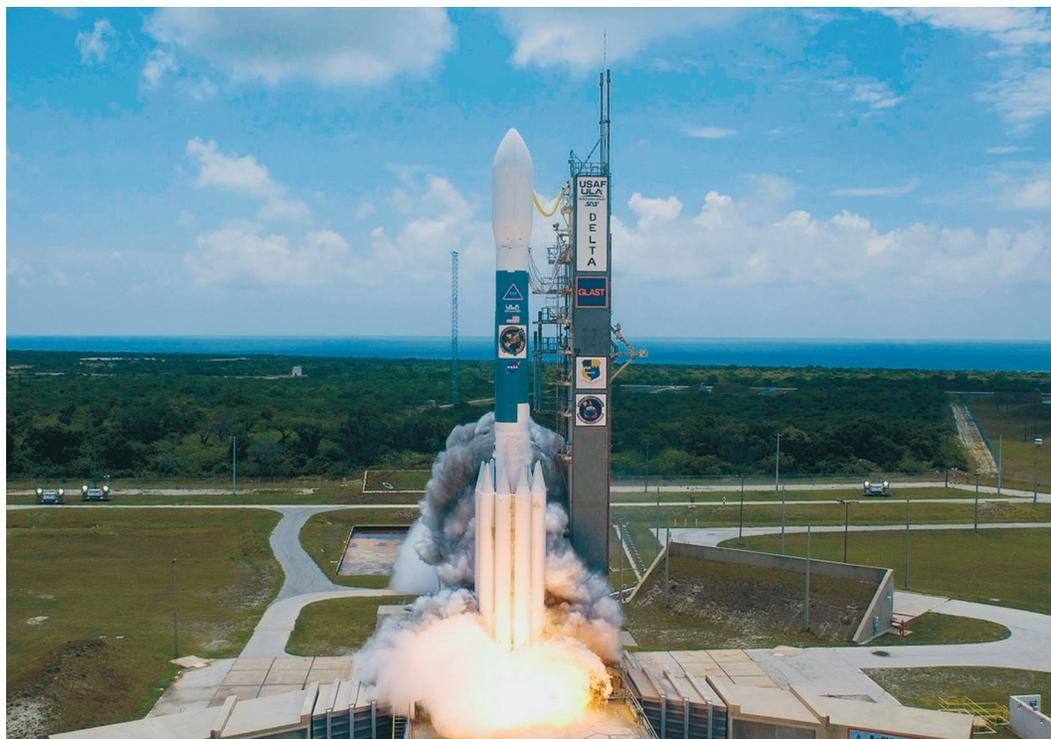
в честь выдающегося американско-итальянского физика, лауреата Нобелевской премии по физике Энрико Ферми. Ученый внес значительный вклад в развитие квантовой теории, физики частиц, ядерной и статистической физики. В 1942 г. в Чикагском университете под его руководством был создан первый ядерный реактор с самоподдерживающейся реакцией. В астрофизике Э. Ферми предложил статистический процесс ускорения частиц ударными волнами – основной механизм ускорения космических лучей, впоследствии подтвержденный наблюдениями.

Обсерватория “Ферми” размером 2,5 × 2,5 × 2,9 м и массой 4303 кг создана по программе международного сотрудничества США, Франции, Герма-

нии, Италии, Швеции и Японии. На телескопе установлено два инструмента: гамма-телескоп с большой эффективной поверхностью **LAT** (Large Area Telescope) и детектор гамма-всплесков **GBM** (Gamma-ray Burst Monitor). Детектор гамма-всплесков состоит из 14 отдельных приемников с полем зрения, покрывающим все небо, 12 из них работают в диапазоне энергий 8 кэВ – 1 МэВ, два – 150 кэВ – 40 МэВ. Детекторы обладают очень хорошими временным и энергетическим разрешениями и очень плохим угловым разрешением, достаточным, тем не менее, чтобы обеспечить целеуказание для гамма-телескопа LAT.

Основной инструмент, гамма-телескоп LAT, работает в диапазоне





20 МэВ – >300 ГэВ и включает 16 (4×4) идентичных модулей. Каждый модуль состоит из трекера и калориметра, весь инструмент окружен системой антисовпадений. Трекеры содержат по 18 кремниевых пластин из двух слоев, они обеспечивают измерение X- и Y-координат пролетевшей частицы. 16 верхних пластин покрыты тонким слоем вольфрама для конвертации начального фотона в пару электрон-позитрон. Калориметры содержат 96 кристаллов йодида цезия с примесью таллия CsI(Tl) размером $2,7 \times 2,0 \times 32,6$ см каждый. Кристаллы расположены в восьми слоях для измерения полной

энергии каскада (первоначального фотона или частицы) и измерения профиля каскада. Последний необходим для дополнительного разделения адронных каскадов, в основном инициированных протонами, и электромагнитных ливней. Вертикальная толщина калориметра составляет 8,6 радиационной длины (радиационная длина – это средняя толщина вещества, на которой энергия электрона уменьшается в e раз – в основном вследствие тормозного излучения), а всего инструмента – 10,1. Детектор антисовпадений снаружи телескопа, обладающий эффективностью 99,97%, необхо-

Запуск космической обсерватории “GLAST” (“Ферми”) ракетой-носителем “Дельта-2” с мыса Канаверал 11 июня 2008 г. Фото NASA.

дим для отсека фона заряженных частиц, который на много порядков превышает поток гамма-квантов. Собранный инструмент выглядит как прямоугольный параллелепипед с сечением $1,8 \times 1,8$ м и с высотой 0,72 м. Его поле зрения – 2,4 стер, эффективная площадь – 8 тыс. см^2 , энергетическое разрешение – 10–15%, угловое – $3,5^\circ$ при 100 МэВ, достигающее примерно



Космическая гамма-обсерватория “Ферми” на орбите. Во врезке – эмблема проекта. Рисунок NASA.

0,1° при энергии фотона выше нескольких гигаэлектронвольт.

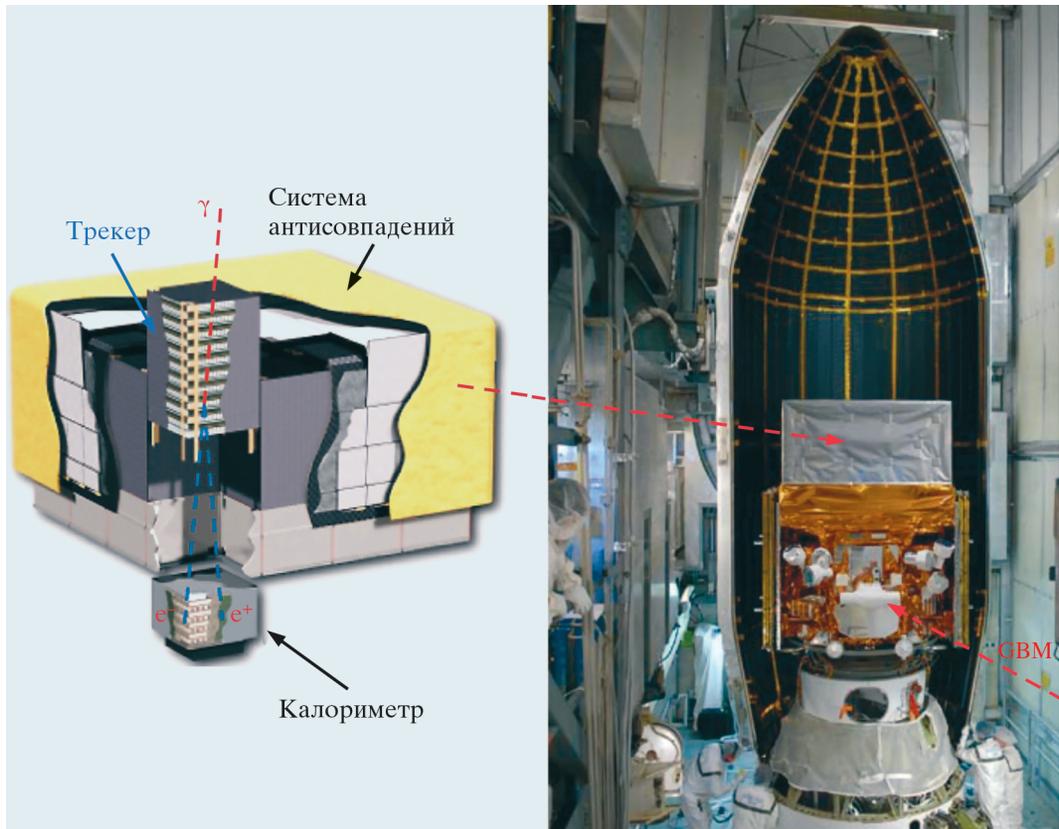
Значительное поле зрения телескопа (2,4 стерадиана) позволяет одновременно охватить до 20% всей небесной сферы, поэтому “Ферми” используется в непривычном для других телескопов режиме. Стандартный режим – обзор всего неба каждые 3 ч, таким образом каждый участок неба наблю-

дается в течение 30 мин. В случае отдельных событий, для которых важны непрерывные наблюдения, таких, например, как солнечные вспышки или гамма-всплески, сканирование неба прекращается и телескоп автоматически направляется в нужную область неба. Важнейший аспект работы телескопа LAT – полная доступность его данных для всего мирового сообщества.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

За время эксплуатации обсерватория “Ферми” зарегистрировала более 5×10^{11} фотонов.

В **первый каталог “Ферми”**, опубликованный по итогам первых двух лет, вошли источники, обнаруженные в диапазоне 100 МэВ – 100 ГэВ. В каталог включены 1873 источника различной природы, из них 577 не идентифицированы. Среди отождествленных источников есть уже известные и впервые обнаруженные. К первым относятся радиогалактики и квазары, гамма-всплески, Большое Магелланово Облако, диффузное галактическое излучение, изолированные пульсары, вспышки на Солнце и в атмосфере Земли, зем-



ной лимб. Хотя источники таких типов уже были открыты, “Ферми” значительно увеличил их число, а также точность и качество измерений. Ко вторым относятся галактики с большой скоростью звездообразования, Малое Магелланово Облако, шаровые скопления, планетарные туманности, остатки сверхновых, двойные звезды, новые звезды, пульсары в двойных системах и миллисекундные пульсары, Луна, гамма-излучение спокойного Солнца, возникающее при взаимодействии космических лучей с атмосфе-

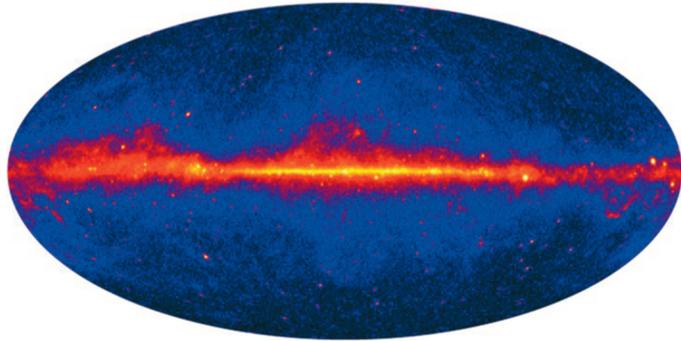
рой Солнца и солнечными фотонами.

Дальнейшее накопление статистики позволило создать первый **каталог источников “Ферми” высоких энергий**, в который вошли источники с энергией более 10 ГэВ, опубликованный по итогам первых трех лет исследований. В каталоге 514 источников, 65 из них не идентифицированы. Такой каталог представляет собой очень важный мост между спутниковой и наземной гамма-астрономией, так как до недавнего времени существовал значительный разрыв меж-

Схема гамма-телескопа LAT и космическая обсерватория “GLAST” (“Ферми”) во время подготовки к старту. Указан детектор гамма-всплесков GBM. Космодром Канаверал. Рисунок и фото NASA.

ду диапазонами энергий этих двух типов телескопов. Поскольку обсерватория “Ферми” обзревает все небо, такой каталог можно использовать для планирования наблюдений наземными телескопами, чьи ресурсы значительно ограничены.

Карта обзора неба при энергиях больше 1 ГэВ, составленная по результатам четырех лет наблюдений телескопом LAT на обсерватории "Ферми". Многие источники видны невооруженным глазом. NASA.



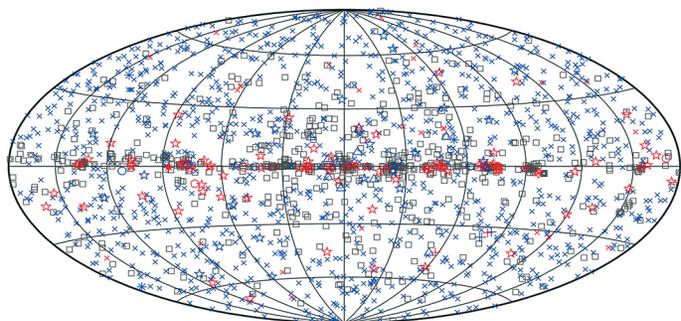
К одному из самых интересных относится открытие загадочных **пузырей Ферми** (Fermi bubbles). "Пузыри", то есть гигантские выбросы газа из центральных частей галактик, часто наблюдаются в радио- и рентгеновском диапазоне. Их связывают с процессами аккреции на центральную сверхмассивную черную дыру. Открытие таких же пузырей в нашей Галактике обсерваторией "Ферми" оказалось совершенно неожиданным. Они представляют собой огромные структуры, простирающиеся на 55° выше и ниже Галактической плоскости и предположительно связанные с прошлой активностью в центре Галактики. Спектр их излучения достаточно жесткий, доходит до

100 ГэВ. Такой спектр свидетельствует либо о недавнем происхождении этих пузырей, что входит в противоречие с их предположительно огромными размерами, либо о процессах ускорения в этих пузырях, что также нелегко объяснить. В настоящее время нет доминирующей гипотезы об их происхождении. Накопление данных "Ферми" позволит более детально изучить их морфологию и, возможно, пролить свет на их происхождение.

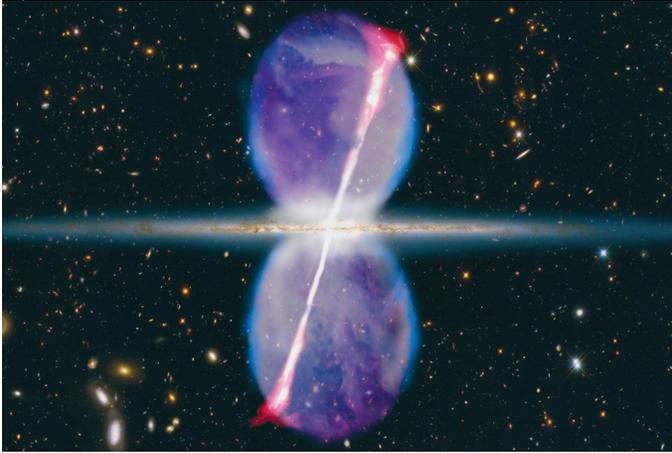
Самый распространенный класс источников в каталоге "Ферми" — **ак-**

тивные ядра галактик (1092): блазары, радио-квазары с жестким спектром, Сейфертовские галактики и активные ядра других типов. В центре каждой галактики находится сверхмассивная черная дыра, которая ведет себя по-разному в зависимости от окружения. В нашей Галактике аккреция на центральную черную дыру очень мала, поэтому она ничем себя не проявляет, кроме редких случаев небольшой активности в рентгеновском диапазоне. У блазаров активная аккреция на центральную черную дыру при-

Первый каталог источников Ферми в диапазоне энергий более 100 МэВ, составленный по результатам первых двух лет наблюдений. Обозначены 1873 источника, зарегистрированные обсерваторией "Ферми". Рисунок Fermi-LAT, NASA



- Неидентифицированные: 575
- ×, × Активные ядра галактик: 1092
- * Галактики со взрывным звездообразованием: 4
- ++, Галактики: 6
- ☆ Пульсары: 108
- Остатки сверхновых: 10
- Другие: 77



Пузыри Ферми – огромные структуры, видимые в гамма-диапазоне. Они простираются на 55° выше и ниже Галактической плоскости и предположительно связаны с прошлой активностью в центре Галактики. Рисунок NASA.

водит к формированию огромного диска из горячего газа размером до нескольких парсек. Этот диск интенсивно излучает в инфракрасном и рентгеновском диапазонах, а оптическое излу-

чение сильно поглощается межзвездной пылью и поэтому чаще всего не видно. Не все аккрецирующее вещество поглощается черной дырой, часть его выбрасывается в виде релятивистских

струй из плазмы длиной десятки и сотни килопарсек, движущихся почти со скоростью света. Тип активности таких галактик в основном зависит от ориентации аккреционного диска и струй относительно наблюдателя. Если одна из струй направлена на наблюдателя (блазары), то ее излучение усиливается вследствие релятивистских эффектов. Это также объясняет высокую светимость блазаров, быстрые изменения их яркости, высокую поляризацию излучения и кажущееся движение струи со сверхсветовой скоростью.

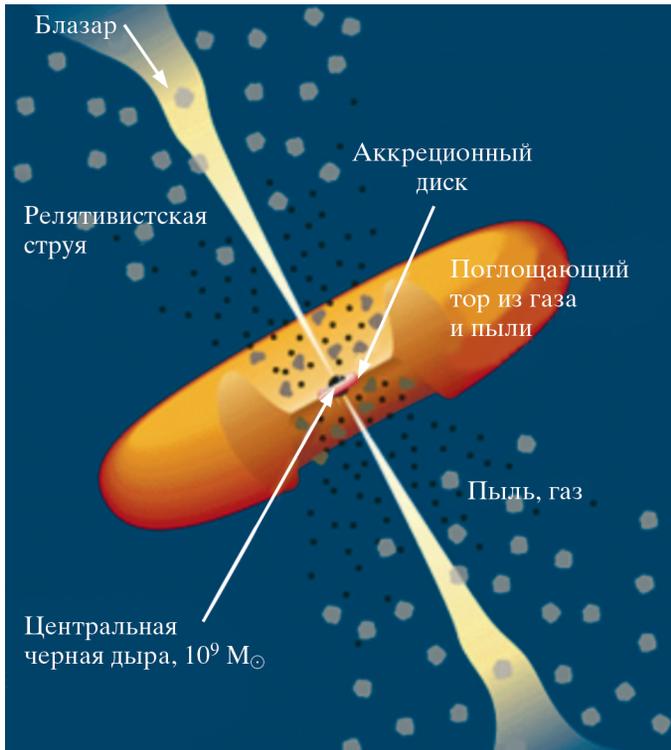
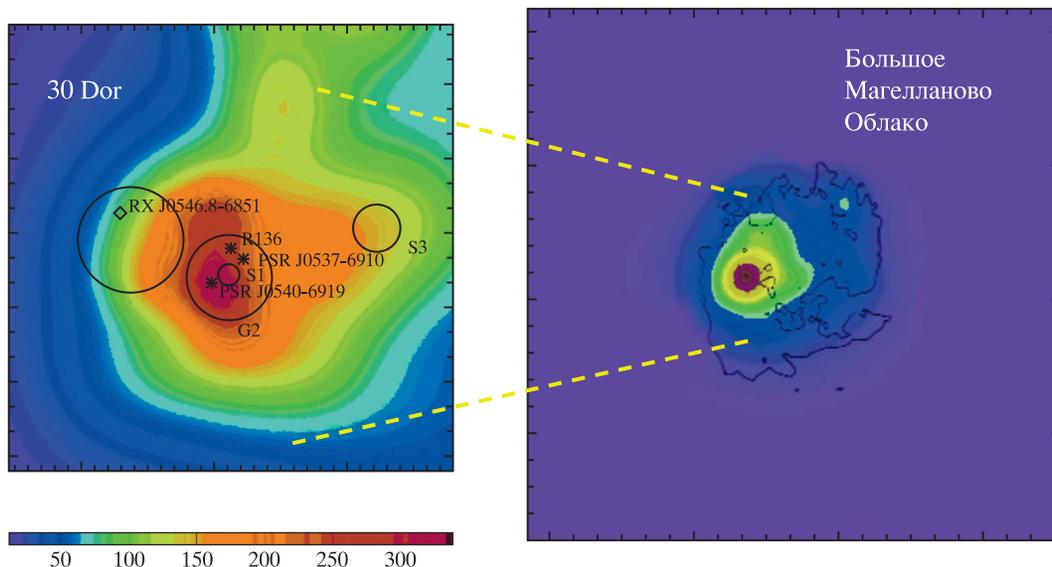


Схема строения активного ядра галактики. В центре находится сверхмассивная черная дыра массой $10^9 M_\odot$, которая аккрецирует окружающее вещество. Центральный регион окружен толстым газопылевым тором. Из пространства около центральной черной дыры вылетают две релятивистские струи плазмы, направленные в противоположные стороны. Наблюдатель, на которого направлена струя, увидит блазар.



Большое Магелланово Облако (справа) и регион активного звездообразования 30 Doradus в гамма-лучах (более 100 МэВ). Внизу – шкала интенсивности излучения. Рисунок Fermi-LAT.

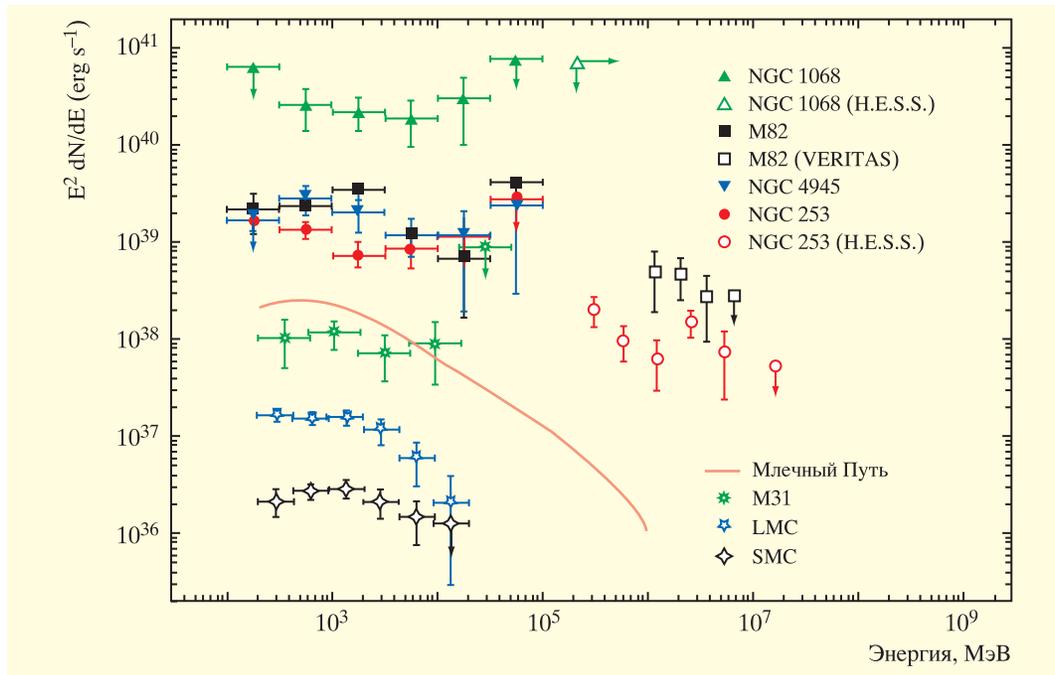
стью. Активные ядра галактик – одни из наиболее ярких объектов во Вселенной, поэтому они видны с огромных расстояний.

Гамма-излучение обнаружено также у **обычных галактик**: Большого и Малого Магеллановых Облаков, галактики в созвездии Андромеды (M31), галактик со взрывным звездообразованием M82, NGC 253, NGC 1068, NGC 4945. Магеллановы Облака и M31 находятся сравнительно недалеко от нас, и гамма-из-

лучение от них можно разрешить. В частности, наблюдается мощный поток гамма-излучения от региона активного звездообразования 30 Doradus в Большом Магеллановом Облаке, спутнике нашей Галактики. Наблюдение звездообразования в другой галактике предоставляет возможность впервые “увидеть” процессы ускорения частиц и распространения космических лучей “снаружи”. Вблизи этого региона нет других источников космических лучей, что позволило впервые оценить коэффициент диффузии космических лучей в межзвездной среде в другой галактике. Он оказался довольно близок к тому, что наблюдается и в нашей Галактике.

Детальные наблюдения и моделирование **диффузного гамма-из-**

лучения от нашей Галактики позволяют понять процессы его генерации и в других нормальных галактиках. Спектр становится жестче при переходе от Магеллановых Облаков и M31 к галактикам со взрывным звездообразованием. Это можно объяснить, вспомнив, что из нормальных галактик большая часть космических лучей улетает без взаимодействия и вытекает тем быстрее, чем больше энергия частиц. Этим объясняется более крутой наклон спектра космических лучей при сравнении его со спектром ускоренных частиц в оболочках остатков сверхновых. В галактиках со взрывным звездообразованием межзвездная среда становится настолько турбулентной, что выход ускоренных частиц сильно затруднен. Спектр кос-



мических лучей в межзвездной среде остается почти таким же, как и в источниках – оболочках остатков сверхновых. Основной же процесс генерации гамма-излучения – рождение пионов в протон-протонных и протон-ядерных столкновениях космических лучей с частицами межзвездного газа, при этом показатель спектра гамма-излучения близок к показателю спектра протонов в межзвездной среде.

Самыми энергичными процессами во Вселенной считаются **гамма-всплески** (Земля и Вселенная, 2005, № 6). Современные теории связывают гамма-всплески с коллапсом сверхновых или гиперновых звезд в

удаленных галактиках. В результате такого коллапса в течение короткого времени генерируется пучок интенсивного излучения. Поскольку источники большинства гамма-всплесков находятся в миллиардах световых лет от Земли, они должны обладать огромной мощностью. Гамма-всплески были известны еще до “Ферми”, например, максимальная энергия фотонов одного из четырех гамма-всплесков, зарегистрированных телескопом EGRET, равнялась 18 ГэВ. Оставалось неясным, насколько далеко может простирается спектр всплесков и насколько типично для них наличие высокоэнергичных фотонов. Недавно опубликованный

Спектр гамма-излучения от нормальных галактик становится жестче при переходе от Магеллановых Облаков и M31 к галактикам со взрывным звездообразованием. Из нормальных галактик космические лучи вытекают тем быстрее, чем больше их энергия. Рисунок Fermi-L AT.

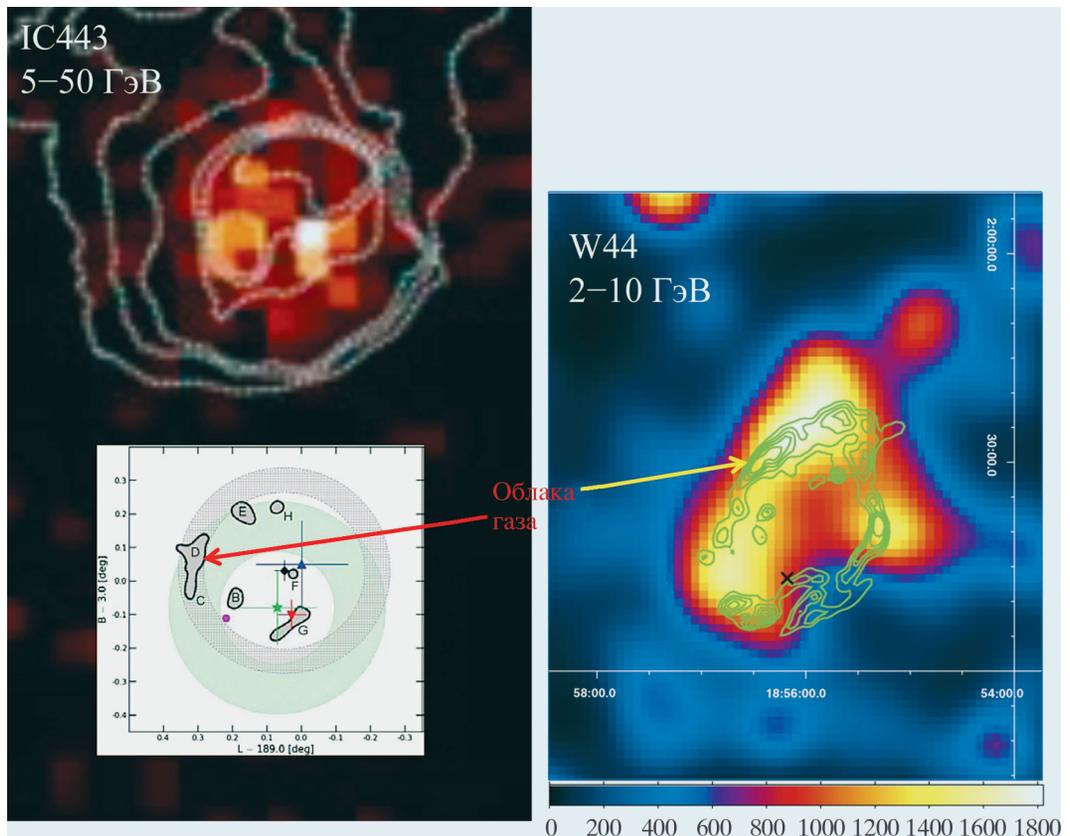
каталог гамма-всплесков “Ферми” содержит 35 событий с энергией фотонов, превышающей 20 МэВ. Они относятся к самым ярким всплескам из тех, что одновременно зафиксировали телескоп LAT и монитор GBM. Максимальная энергия фотонов составила более 33 ГэВ в системе наблюдателя, что соответствует

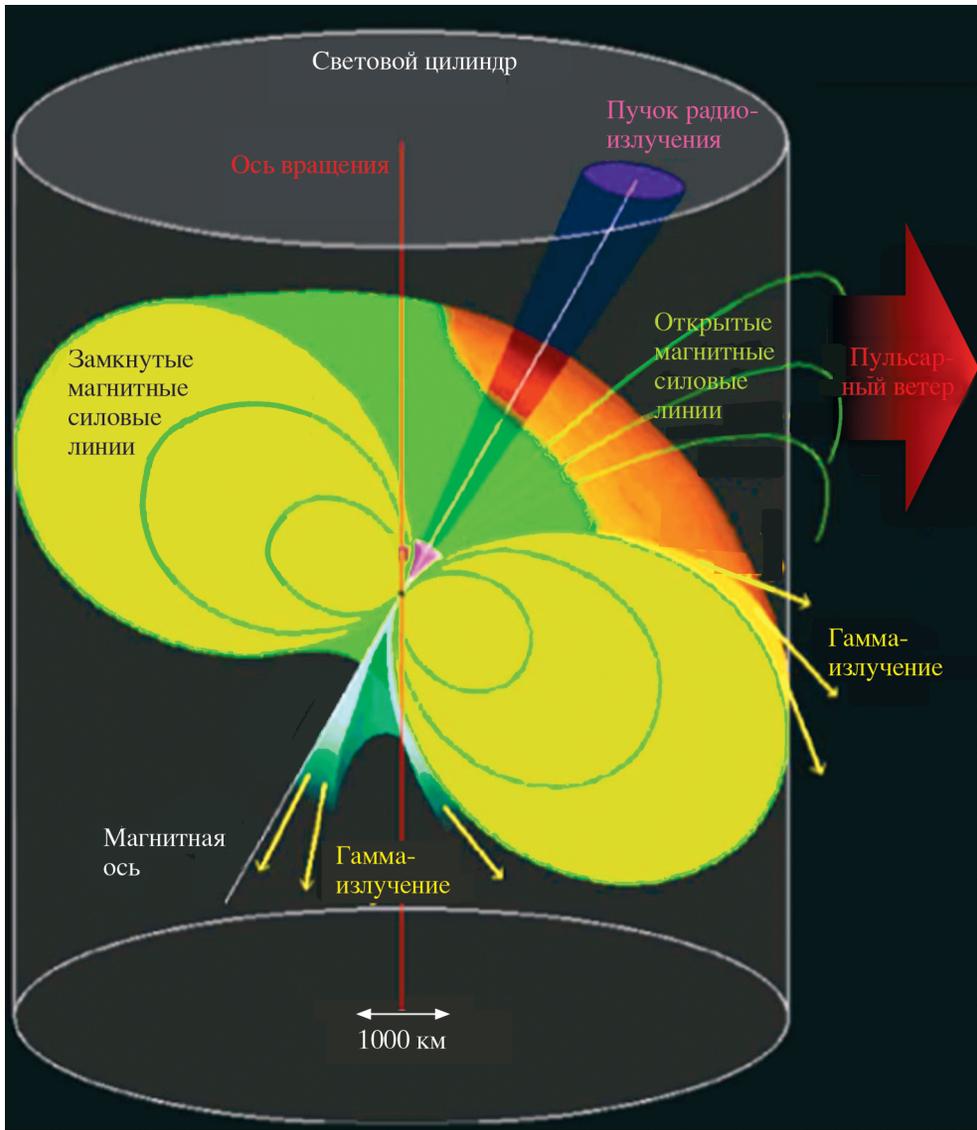
примерно 100 ГэВ в системе источника. Такие фотоны наблюдались от очень далеких источников, включая самый удаленный из увиденных “Ферми” – имеющий красное смещение $z = 4,35$ и находящийся на расстоянии 12 млрд св. лет.

Остатки сверхновых IC443 и W44 в гамма-диапазоне. Во врезке – расположение облаков газа вокруг IC443 и W44. Стрелками указаны контуры межзвездного газа разной толщины. Рисунок Fermi-LAT.

Другой распространенный класс источников гамма-излучения – **пульсары** (быстро вращающиеся нейтронные звезды с сильным магнитным полем; Земля и Вселенная, 1971, № 2; 1991, № 1). В настоящий момент известны 117 пульсаров, до “Ферми” их было только семь. Среди них примерно 2/3 – молодые пульсары, половина из них – почти невидимые в радиодиапазоне и найденные благодаря наблюдениям “Ферми”. Оказалось, что пучок гамма-излучения от пульсара более широкий, чем пучок радиоизлучения, и,

следовательно, в гамма-диапазоне можно увидеть большее количество пульсаров, чем в радио-диапазоне. Это открытие важно для понимания процессов, происходящих в магнитосфере пульсаров. Еще треть – миллисекундные пульсары; считается, что это старые нейтронные звезды в двойных системах, раскрученные аккрецией вещества со звезды-компаньона. Такие пульсары имеют очень стабильный период и могут использоваться для поиска гравитационных волн. Количество известных миллисекундных пульса-





ров значительно увеличилось благодаря наблюдениям "Ферми".

Необходимо отметить знаменитый пульсар PSR B0531+21 в Крабовидной туманности (M1, NGC 1952), открытый в 1968 г., он вращается с периодом 0,033 с. Пульсар и туманность – остатки взрыва Сверхновой в

июле 1054 г. Это событие записано в летописях китайских и арабских астрономов как появление "звезды-гостя". Оба объекта излучают на всех длинах волн и часто использовались в качестве "стандартной свечи", так как поток излучения от них очень стабильный. Одно из замечательных

Схема пульсара. Радиоизлучение выходит вдоль направления оси магнитного диполя, гамма-излучение – более широким конусом.

открытий обсерватории "Ферми" – вспышки 2009 г. и 2010 г. в Крабовидной туманности. Светимость

туманности увеличивалась на короткий период в пять раз. В 2011 г. была зарегистрирована мега-вспышка, в течение которой светимость увеличивалась в 30 раз! Вспышки меньшей мощности наблюдаются по нескольку раз в год. Временной анализ этих вспышек дает размер излучающей области менее 0,0004 пк. Пульсирующее же излучение от самого пульсара PSR B0531+21 наблюдается даже при энергиях, превышающих 100 ГэВ!

Остатки сверхновых долгое время считались основными источниками космических лучей, но отсутствовало прямое доказательство ускорения в них протонов. Наблюдаемое излучение вполне можно было объяснить обратным комптоновским рассеянием или синхротронным излучением ускоренных электронов. Изучение остатков сверхновых IC443 и W44 возрастом около 20 тыс. лет с помощью обсерватории “Ферми” показали, что, во-первых, морфология гамма-излучения коррелирует с распределением газа, во-вторых, спектр гамма-излучения с энергией ниже 10 ГэВ имеет форму, характерную для распада пионов. Впервые было убедительно

доказано существование энергичных протонов в оболочках остатков сверхновых. Всего зафиксировано гамма-излучение от более чем десятка остатков сверхновых, что позволяет изучать процессы ускорения частиц в ударных волнах.

Вспышки на Солнце и ускоренные во вспышках частицы могут нарушить магнитное поле Земли и привести к проблемам с радиосвязью, вызвать сильные полярные сияния и повлиять на наше самочувствие. Кроме этого, тормозное излучение электронов и распад нейтральных пионов, рожденных ускоренными протонами, дают гамма-всплеск, из-за близости Солнца он может быть очень ярким. Солнечные вспышки многократно наблюдала обсерватория “Ферми”, но и спокойное светило – яркий источник гамма-излучения, точнее два источника. Космические лучи, приходящие из Галактики, наполняют Солнечную систему (Земля и Вселенная, 1988, № 3; 2002, № 4). Они бомбардируют планеты, спутники и атмосферу Солнца, в результате возникают каскады (ливни) вторичных частиц и множество нейтральных пионов, поэтому все тела Солнечной

системы светятся в гамма-диапазоне. Вторым источником гамма-излучения Солнца – обратное комптоновское рассеяние Галактических электронов на оптических фотонах Солнца. Эти фотоны наполняют гелиосферу и рассеиваются электронами космических лучей. Данное излучение приходит со всего неба, но наиболее интенсивно оно вблизи направления на Солнце, так как вблизи него плотность фотонов наибольшая. Наблюдения гамма-излучения от диска Солнца позволяют изучить распределение плотности вещества и магнитных полей в его атмосфере. Наблюдения излучения от рассеяния солнечных фотонов на Галактических электронах позволяют понять, как распределяются заряженные частицы во внутренней гелиосфере, включая пространство в непосредственной близости от поверхности Солнца.

В заключение отметим, что космическая обсерватория “Ферми” оказалась настолько удачным инструментом, что уже собранного ею огромного количества данных астрофизикам хватит для работы надолго. Телескоп будет продолжать обзоры неба до 2018 г., а возможно, и дольше.