

Гамма-мониторинг космоса

Г.С.Бисноватый-Коган,

доктор физико-математических наук
Институт космических исследований РАН

Отмечая в этом году 100 лет со дня рождения великого советского физика Якова Борисовича Зельдовича, мы вспоминаем его как одного из главных создателей советского ядерного оружия и человека, внесшего фундаментальный вклад во многие области современной физики и астрофизики. Мне посчастливилось быть одним из первых аспирантов Я.Б. по астрофизике и на протяжении 15 лет тесно взаимодействовать с ним. Огромную роль для меня сыграли еженедельные, а иногда и более частые семинары нашей небольшой астрофизической группы в Институте прикладной математики РАН, которые обычно сводились к подробной лекции Я.Б. по самым различным вопросам астрофизики и космологии. Без всякого преувеличения могу сказать, что о всех проблемах космологии, формирования крупномасштабной структуры Вселенной, физики нейтрино и многое другое я впервые узнал на этих семинарах, а постоянное обсуждение и необходимость активного участия в них обеспечивало знаниями, вполне достаточными для начала самостоятельной работы в этих областях. В наших работах с Я.Б. исследовались свойства релятивистской плазмы, и был обнаружен верхний предел температуры оптически прозрачной релятивистской плазмы с рождением электронно-позитронных пар. В других работах, совместно с В.М.Чечеткиным и З.Ф.Сеидовым и др., было рассмотрено образование неравновесного слоя в оболочках нейтронных звезд, их роль в нуклеосинтезе и в нестационарных процессах на нейтронных звездах, а также взаимодействие нейтрино с ядрами в различных ядерных моделях, что оказалось важным для анализа экспериментов по детектированию нейтрино от сверхновых. Мы все время чувствовали постоянную поддержку Я.Б., как научными советами и обсуждениями, так и в плане помощи для участия в конференциях, получения устных выступлений и др. Я.Б. часто существенно помогал при написании статьи, отказываясь затем становиться соавтором. Вспоминаю самый яркий пример, когда он собственноручно написал введение к нашей с Чечеткиным статье в *Astrophys. Space Science* (1974), но категорически запретил включать себя в соавторы.

Я.Б. учил нас не замыкаться в узком кругу какой-либо частной задачи, а думать о проблеме в целом

и постоянно расширять круг своих интересов. Главное, как он говорил, это понять, что же происходит на самом деле. Проблемой детектирования гамма-излучения высоких энергий я начал заниматься в последний год жизни Зельдовича, когда в Институте космических исследований шла работа над созданием спутника «Гамма-1», предназначенного для детектирования гамма-квантов с энергией от 50 МэВ до 5 ГэВ.

Новая концепция гамма-мониторинга

В классической области гамма-астрономии высоких энергий (от нескольких десятков мегаэлектронвольт до сотен гигаэлектронвольт) атмосфера непрозрачна, поэтому наблюдения возможны только из космоса. Благодаря специализированным спутникам — *Cos B* (работавшему в 1975—1982 гг.), Комптонской гамма-обсерватории (прибору EGRET — *Energetic Gamma Ray Experiment Telescope* — Телескоп для эксперимента в области жесткого гамма-излучения, 1991—2000 гг.), *AGILE* (*Astro-rivelatore Gamma a Immagini LEggero* — Легкий космический телескоп для построения изображений в гамма-диапазоне, с 2007 г.), Космической обсерватории им.Э.Ферми (с 2008 г.) — были открыты диффузный фон, точечные и протяженные источники высокоэнергетического гамма-излучения. Большинство точечных источников (если не все они) связаны с компактными объектами, нейтронными звездами и черными дырами звездной массы внутри Галактики, а также с активными ядрами галактик, в которых расположены сверхмассивные черные дыры. Протяженные источники представлены плотными молекулярными облаками, в которых рождаются гамма-кванты при взаимодействии их вещества с космическими лучами. Те же источники в далеких галактиках создают, по-видимому, и изотропный диффузный фон в этой области энергий.

Гамма-астрономия высоких энергий берет на учет каждый отдельный квант, для которого в индивидуальном порядке находятся энергия и направление, откуда он приходит. Поток частиц, регистрируемых гамма-телескопом, довольно мал, так что время между приходами квантов превышает время задержки прибора, в течение которого регистрация невозможна. В этих условиях

разумнее всего иметь прибор с максимально возможной апертурой, чтобы обнаруживать все падающие на него кванты. Для каждого кванта необходимо определить направление прилета и тем или иным образом измерить энергию.

Первые два упомянутых выше космических гамма-телескопа, к которым можно добавить российский спутник с телескопом «Гамма-1», регистрировали направление прихода кванта, прослеживая его движение с помощью искровых камер, в двух последних вместо искровых камер использовались позиционно-чувствительные кремниевые пластины. В обоих вариантах контролировались траектории электронно-позитронной пары, рожденной энергичным гамма-квантом, от места его конверсии до попадания в калориметр.

Запуск аппарата «Гамма-1» получился неудачным — отказали искровые камеры, которые должны были фиксировать траектории полета электрона и позитрона. В результате оказалось практически невозможным определить направление прилета кванта. Для измерения энергии устанавливался массивный калориметр, позволявший измерять энергию кванта с точностью до 5–10%, но по чисто геометрическим причинам препятствующий увеличению апертуры телескопа (рис.1).

Следует, однако, иметь в виду, что для многих научных задач важнее сам факт регистрации гамма-кванта, энергию которого можно знать и менее точно (с погрешностью до ~20%). Это относится практически ко всем точечным гамма-источникам, когда наблюдаются большие колебания потока, поэтому построение непрерывной по времени кривой блеска было бы гораздо более информативным, чем более строгие, но эпизодические измерения спектра. Более того, при большой апертуре подобный телескоп мог бы следить одновременно за многими источни-

ками на небе, что увеличивало бы его эффективную чувствительность. Непрерывные наблюдения больших участков неба особенно критичны для коротких событий типа космических гамма-всплесков, направление на которые заранее неизвестно.

В 1993 г. была предложена новая конструкция телескопа для регистрации космического гамма-излучения высоких энергий [1, 2], получившая название ЦИГАМ (CYGAM — Cylindrical Gamma Monitor, Цилиндрический гамма-монитор, рис.2). В ней отсутствовал калориметр, что сразу позволяет почти на порядок увеличить апертуру телескопа. Поле зрения прибора составило бы шесть стерadians, т.е. одновременно была бы видна примерно половина небесной сферы. Стенки цилиндра, представляющего в сечении восьмиугольник, должны состоять из конвертора, в котором жесткий гамма-квант переходит в пару электрон—позитрон, и позиционно-чувствительного слоя, регистрирующего пролет заряженных частиц. После конверсии родившиеся частицы летят под углом друг к другу, который уменьшается с ростом энергии исходного гамма-кванта — по величине угла разлета она и определяется. Такой метод имеет ограничение по энергии, доступной для измерений: при энергии кванта, превышающей примерно 40 ГэВ, угол станет слишком малым и позиционно-чувствительный счетчик на противоположной стороне цилиндра не сможет разрешить координаты частиц пары. Предел можно поднять, если повысить точность определения координат прилетающих частиц или увеличить угол между траекториями частиц во время полета между стенками цилиндра (например, за счет создания внутри магнитного поля). Схема регистрации жесткого гамма-кванта на приборе ЦИГАМ представлена на рис.3.

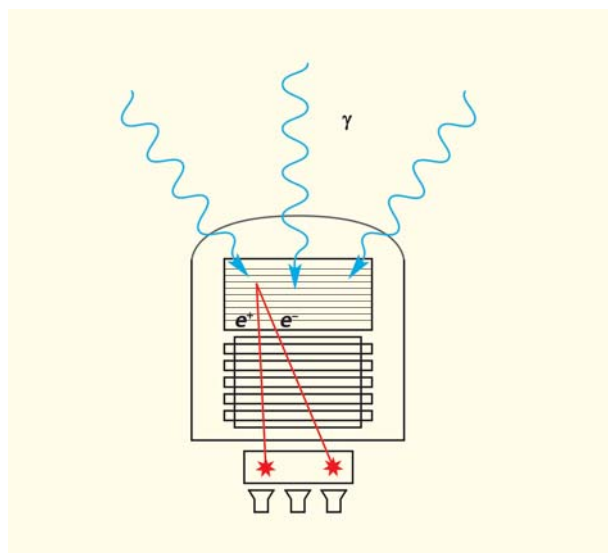


Рис.1. Традиционная схема гамма-телескопа (EGRET) [3].

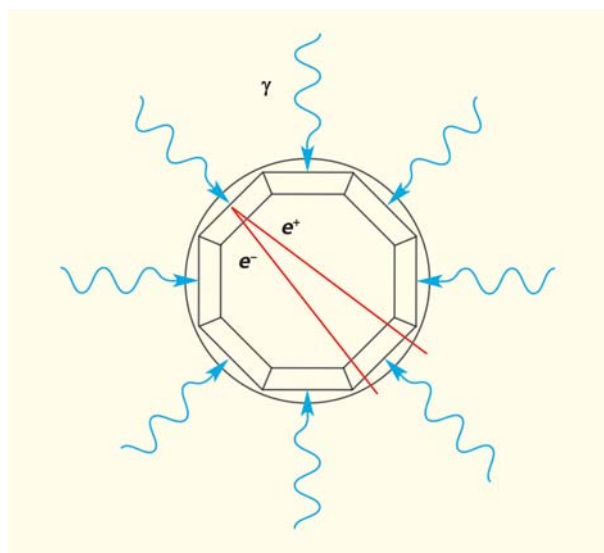


Рис.2. Схема телескопа ЦИГАМ [3].

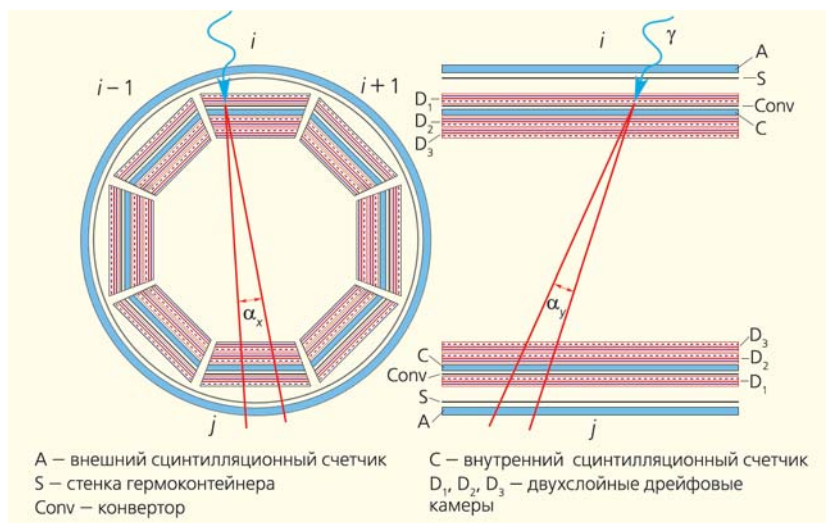


Рис.3. Детальная схема регистрации жесткого гамма-кванта на телескопе ЦИГАМ [3]. Внешняя оболочка служит конвертором, проходя через который гамма-квант рождает электронно-позитронную пару. Примеры пересечения позиционно-чувствительных детекторов при влете и вылете из цилиндра показаны для прямого (вид в торце цилиндра) и косо падения кванта (вид сбоку цилиндра).

Предложенная конструкция прибора должна быть легче за счет отсутствия калориметра и меньшей толщины стенок прибора по сравнению с толщиной слоя искровых камер или кремниевых пластин (стрипов). Наилучшее угловое разрешение, определяемое на основании расчетов Монте-Карло, составляет 25' (угловых минут) при энергии кванта в 1 ГэВ. Сравнить результаты моделирования для ЦИГАМа методом Монте-Карло с характеристиками прибора ЭГРЕТ позволяет приведенная таблица.

Более совершенный прибор LAT (Large Area Telescope — Телескоп большой площади) обсерватории им.Э.Ферми примерно в 20 раз более чувствителен за счет увеличения площади (8000 см²), телесного угла (2 стер), и спектрального диапазона (0.03—300 ГэВ), но его телесный угол зрения в три раза меньше, чем у ЦИГАМа. Это дает последнему преимущество в проведении обзоров, в возможно-

сти непрерывного наблюдения большого числа источников, а также при обнаружении жесткого гамма-излучения вспыхивающих источников, включая космические гамма-всплески. Немаловажен фактор экономичности — вес предлагаемого телескопа в три раза меньше, чем у прибора LAT. Но самое главное преимущество ЦИГАМа — возможность построения почти всех его деталей в России, что может простимулировать развитие не только астрофизики высоких энергий, но и высоких технологий во всей промышленности. Прогресс собственной промышленности для создания спутников и приборов внеатмосферной астрономии — главный приоритет всех без исключения развитых стран, превалирующий над общечеловеческими ценностями по накоплению знаний о Вселенной. Характерным примером последних лет служит отказ Великобритании от участия в проекте INTEGRAL (INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory — Международная астрофизическая лаборатория в области гамма-излучений), что создало существенную брешь в бюджете этого проекта, заланную Россией, данная область науки которой приходила в упадок. Но никакие проценты наблюдательного времени не могут компенсировать упущенные возможности по модернизации экспериментальной базы внутри страны из-за траты денег на поддержку космической науки в Европе. Другой пример — создание итальянского спутника AGILE, который будучи существенно слабее международной лаборатории им.Э.Ферми, сделал гораздо больше для прогресса науки непосредственно в Италии.

Вариант проекта ЦИГАМ, представленный в 1993 г. и детализированный в публикации 2003 г.

[3], в качестве позиционно-чувствительных детекторов предлагал использовать дрейфовые камеры, технология производства которых отработана в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне (он был готов участвовать в данном проекте). К сожалению, проект так и остался на бумаге в зачаточном состоянии, хотя преимущества его казались очевидными. В настоящее время технология производства кремниевых стрипов получила большое развитие (увы, не в нашей стране), так

Таблица

Основные характеристики телескопов EGRET и ЦИГАМ

Параметр	EGRET	ЦИГАМ
Энергетический диапазон, ГэВ	0.03—20	1—40
Максимальная эффективная площадь, см ²	1500 (0.5—1 ГэВ)	2000 (3—10 ГэВ)
Поле зрения, стер	0.6	6
Максимальный геометрический фактор, см ² стер	1050	8500
Угловое разрешение	2.6° (100 МэВ) 1.0° (1000 МэВ)	0.4° (1000 МэВ)
Энергетическое разрешение, %	20	—
Размеры, м	∅ 1.65×2.25	∅ 2×2
Вес, кг	1830	~1000

что окончательный выбор устройств может быть сделан после принципиальных решений по реализации проекта.

Небо в высокоэнергичных гамма-лучах

Наблюдение с помощью телескопа ЦИГАМ позволило бы существенно продвинуться в исследовании как диффузного излучения Галактики (рис.4), так и компактных источников. Среди последних самые загадочные — космические гамма-всплески, природа которых до сих пор не ясна до конца. Основная доля излучения гамма-всплесков приходится на диапазон от 100 кэВ до 1 МэВ, но в ря-

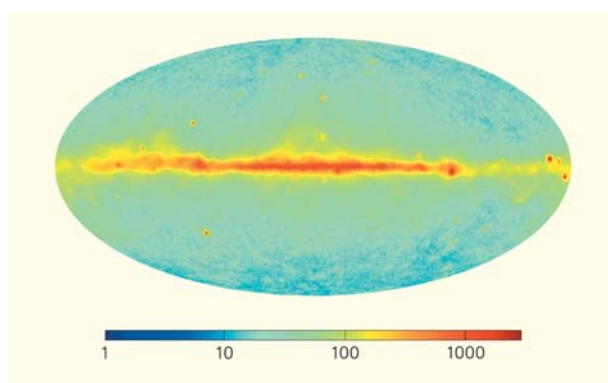


Рис.4. Карта диффузного излучения Галактики в области энергий от 200 МэВ до 100 ГэВ по наблюдениям телескопа LAT [4]. Карта дана в галактических координатах с галактическим центром посередине.

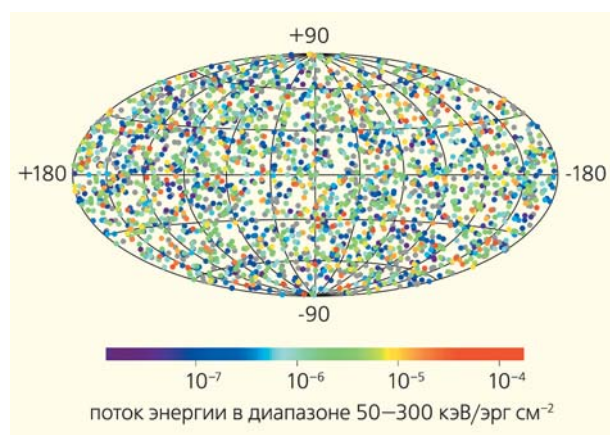


Рис.5. Распределение космических гамма-всплесков на карте звездного неба по данным эксперимента BATSE. Отсутствует какая-либо ярко выраженная концентрация источников к галактической плоскости или к центру Галактики. Нет и концентрации источников в направлении известных ассоциаций астрофизических объектов. Распределение гамма-всплесков изотропно.

<http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/skymap>;
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/pilgrims/cr09.htm>

де случаев наблюдается излучение в области гигаэлектронвольт, причем, как правило, более продолжительное. Распределение по небу (изотропное) всплесков по данным прибора BATSE (Burst and Transient Source Experiment — Эксперимент по вспыхивающим и нестационарным источникам) на Комптоновской гамма-обсерватории приведено на рис.5. 35 космических гамма-всплесков, зарегистрированных прибором LAT, приведены в каталоге 2013 г. [5]. На рис.6 дан пример самого продолжительного излучения гамма-всплеска в жесткой области, зарегистрированного прибором EGRET.

Следующий тип объектов, излучающих в жесткой гамма-области, — радиопульсары. Более 100 радиопульсаров наблюдалось прибором LAT [6], причем около половины из них были открыты впервые в жесткой гамма-области, в которой излучается основная доля энергии электромагнитного спектра радиопульсаров. Схематическая картина формирования гамма-импульса и кривая блеска одного из самых ярких в данной области спектра пульсара Геминга по данным EGRET представлены на рис.7 и 8.

Активные ядра галактик стали самой многочисленной группой отождествленных источников, обладающих к тому же наибольшей светимостью. Их жесткое излучение, видимо, идет от релятивистских выбросов системы «центральная сверхмассивная черная дыра + окружающий ее аккреционный диск». Механизм образования жесткого гамма-излучения таких объектов не вполне ясен, как и не решена до конца проблема ускорения частиц в этих выбросах.

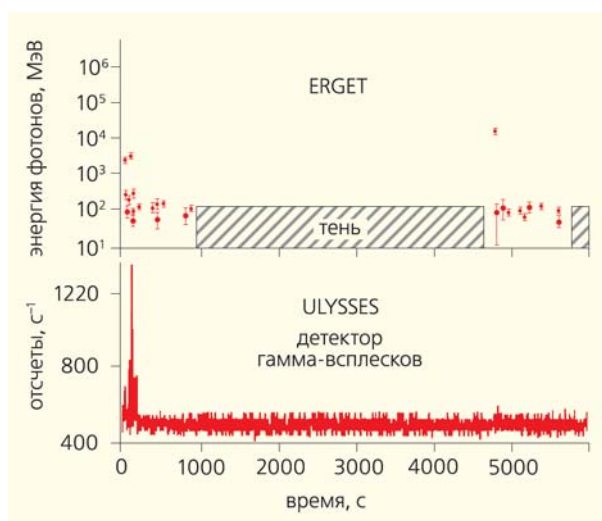


Рис.6. Гамма-всплеск 17 февраля 1994 г., зарегистрированный гамма-телескопом высоких энергий EGRET (сверху) и гамма детектором низких энергий на спутнике ULYSSES (снизу). Высокоэнергичное гамма-излучение продолжается до 1.5 часов после начального всплеска в области малых энергий.

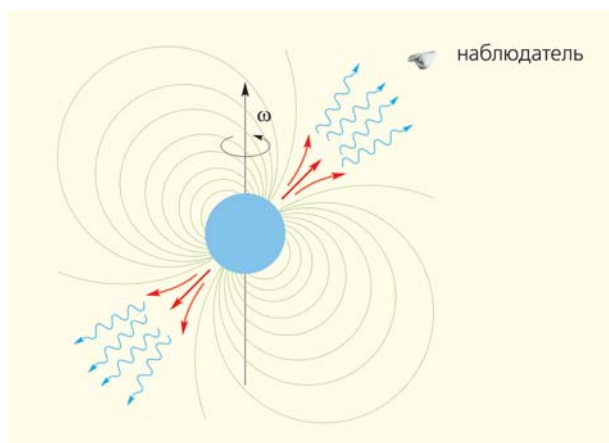


Рис.7. Модель пульсара как вращающейся нейтронной звезды с наклонным дипольным магнитным полем [3].

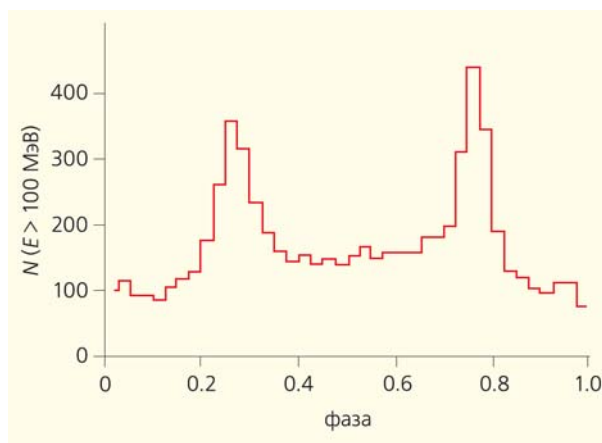


Рис.8. Фазовая кривая блеска гамма-пульсара Геминга по данным EGRET [3].

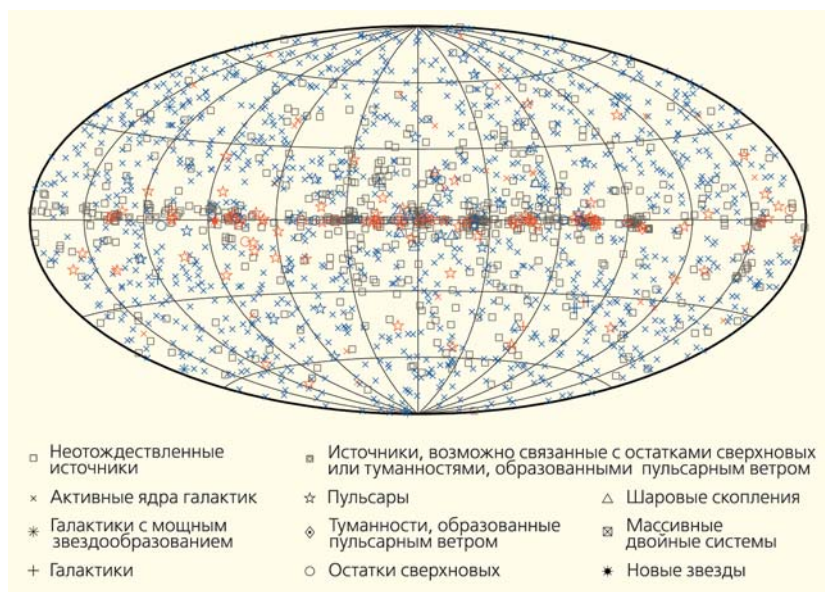


Рис.9. Распределение на небе всех точечных источников, открытых прибором LAT к 2012 г. [7].

Несомненный интерес представляют также наблюдения молодых остатков сверхновых, нестационарных новых и вспыхивающих звезд. Жесткое гамма-излучение наблюдается в солнечных вспышках, что свидетельствует о возможности его генерации во многих звездах нашей Галактики. Использование телескопа с большой апертурой особенно важно для обнаружения жесткого гамма-излучения от космических гамма-всплесков. Можно ожидать как открытия новых источников, так и отождествления в оптическом или радио-диапазонах гамма-источников неизвестной природы. Распределение на небе всех точечных источников, открытых прибором LAT к 2012 г., представлено на рис.9 из каталога [7]. ■

Литература

1. *Bisnovaty-Kogan G.S., Leikov N.G.* Concept of an all-directional high-energy cosmic gamma ray telescope // *Astrophysics and Space Science.* 1993. V.204. №2. P.181—189.
2. *Leikov N.G., Bisnovaty-Kogan G.S.* Cylindrical gamma-ray monitor (CYGAM) concept // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* 1994. V.92. №2. P.679—681.
3. *Акимов В.В., Бисноватый-Коган Г.С., Лейков Н.С.* Цилиндрический гамма-монитор CYGAM. Новая концепция гамма-телескопа высоких энергий. Информационный буклет. М., 2003.
4. *Ackermann M., Ajello M., Atwood W.B. et al.* Fermi LAT observations of the diffuse gamma-ray emission: implications for cosmic rays and the interstellar medium // *ApJ.* 2012. V.750. №1. P.3—35.
5. *Ackermann M., Ajello M., Asano K. et al.* The First Fermi-LAT Gamma-Ray Burst Catalog // *ApJ Suppl.* 2013. V.209. №1. P.11—101.
6. *Abdo A.A., Ajello M., Allafort A. et al.* The Second Fermi Large Area Telescope Catalog of Gamma-Ray Pulsars // *ApJ Suppl.* 2013. V.208. №2. P.17—76.
7. *Nolan P.L., Abdo A.A., Ackermann M. et al.* Fermi Large Area Telescope Second Source Catalog // *ApJ Suppl.* 2012. V.199. №2. P.31—77.