

---

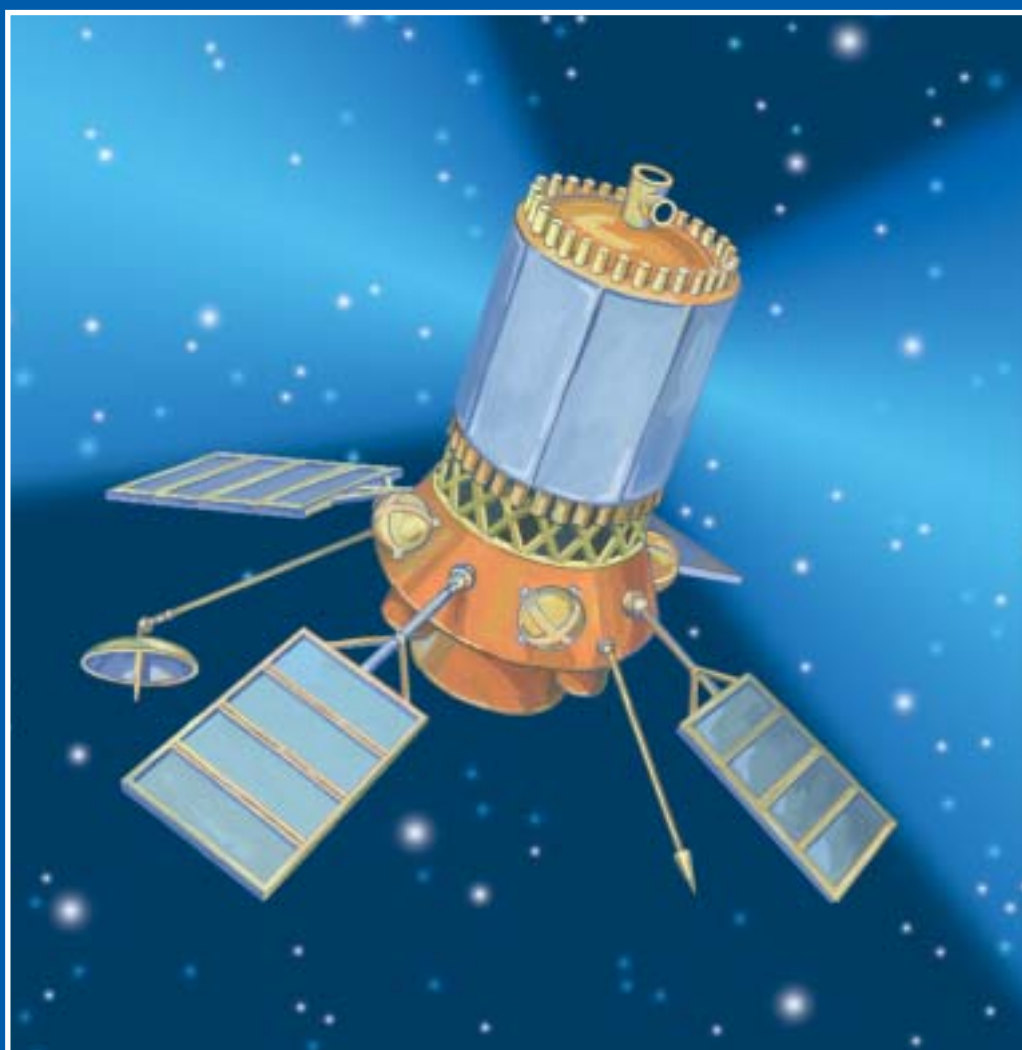
# Цилиндрический гамма-монитор СΥGAM

НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ  
ГАММА-ТЕЛЕСКОПА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ



# CYlindrical GAMMA-ray Monitor СΥGAM

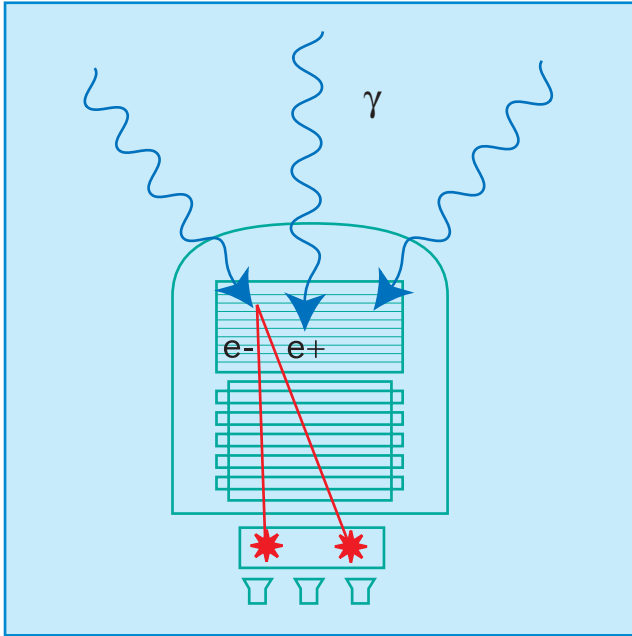
NEW CONCEPT OF THE HIGH-ENERGY  
GAMMA-RAY TELESCOPE



Moscow 2003

---

## ЧЕМ ОТЛИЧАЕТСЯ CYGAM ОТ ТРАДИЦИОННЫХ ТЕЛЕСКОПОВ? WHAT DIFFERENCES CYGAM FROM THE TRADITIONAL TELESCOPES?



Традиционная схема (ERGET).  
Traditional scheme (ERGET).

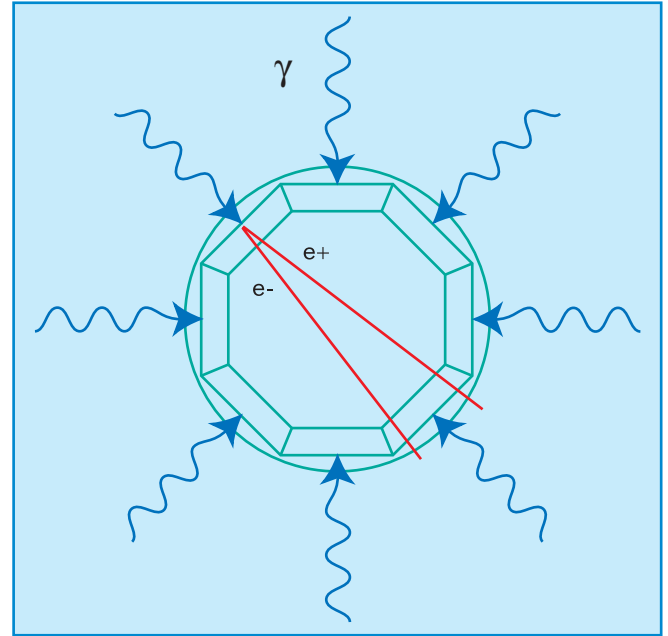


Схема CYGAM.  
Scheme of CYGAM.

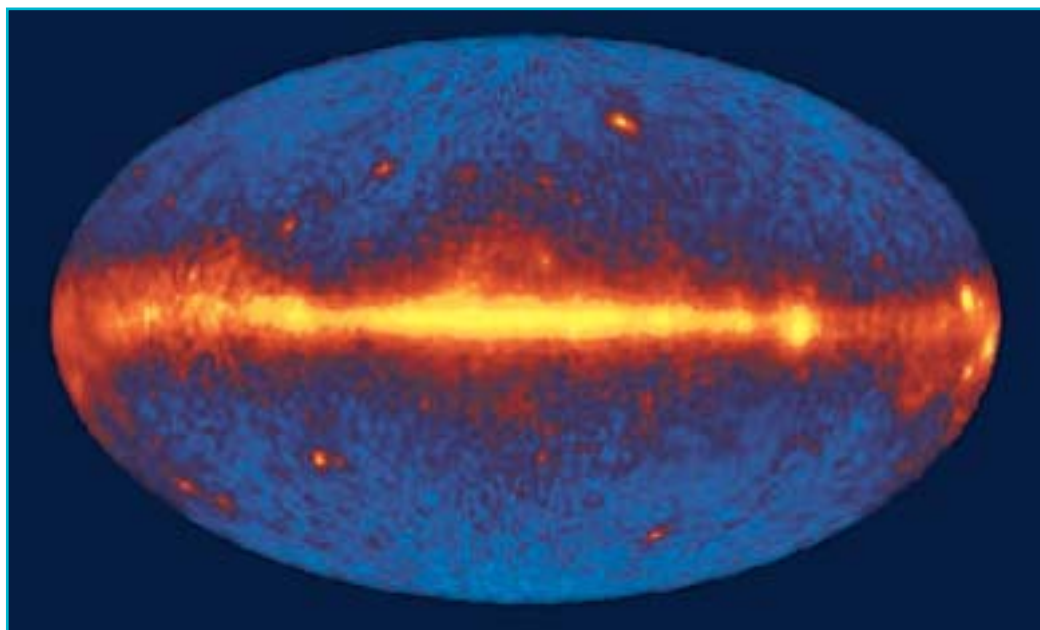
	ERGET	CYGAM
Энергетический диапазон, ГэВ Energy Range, GeV	0,03–20	1–40
Максимальная эффективная площадь, см <sup>2</sup> Maximum Effective Area, cm <sup>2</sup>	1500 (0,5–1GeV)	2000 (3–10GeV)
Поле зрения, стер Field of View, sr	0,6	6
Макс. геометрический фактор, см <sup>2</sup> стер Max. Geometric Factor, cm <sup>2</sup> sr	1050	8500
Угловое разрешение Angle Resolution	2,6 <sup>0</sup> (100 MeV) 1,0 <sup>0</sup> (1000 MeV)	0,4 <sup>0</sup> (1000 MeV)
Энергетическое разрешение, % Energy Resolution	20	—
Размеры, м Dimensions, m	∅ 1,65x2,25	∅ 2x2
Вес, кг Weight, kg	1830	~1000

**Основные  
характеристики**  
**Main Features**

НЕБО В ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ГАММА-ЛУЧАХ  
ПО ДАННЫМ SAS-2 (1972-1973), COS B (1975-1982),  
ГАММА 1 (1990-1992) и ERGET (1991-2000)

SKY IN THE HIGH-ENERGY GAMMA-RAYS ACCORDING  
TO THE DATA OF SAS-2 (1972-1973), COS B (1975-1982),  
GAMMA-1 (1990-1992), AND ERGET (1991-2000)

Диффузное излучение Галактики  
Diffuse emission of our galaxy



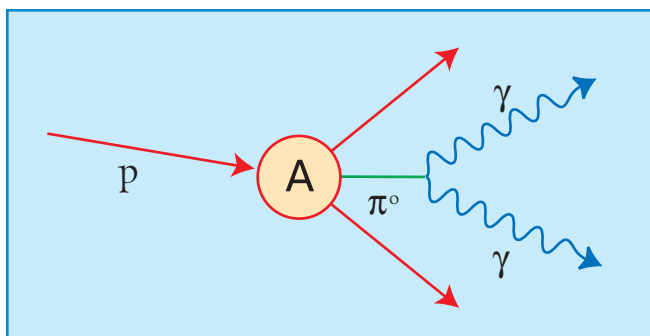
Вид неба  
в гамма излучении  
с энергией выше  
100 МэВ  
по данным EGRET.  
Маленькие яркие  
пятна соответствую-  
ют компактным  
источникам.

View of the sky  
in the gamma-rays  
of energy above  
100 MeV according  
to the ERGET data.  
The small bright  
spots correspond to  
compact sources.

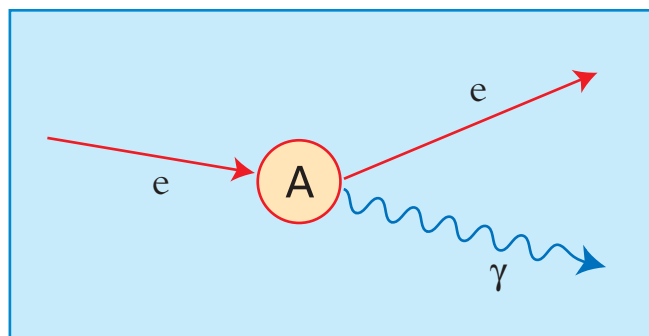
Природа излучения  
Nature of the emission

Взаимодействие протонов и электронов космических лучей с межзвездным газом.

Interaction of the cosmic-ray protons and electrons with the interstellar gas.

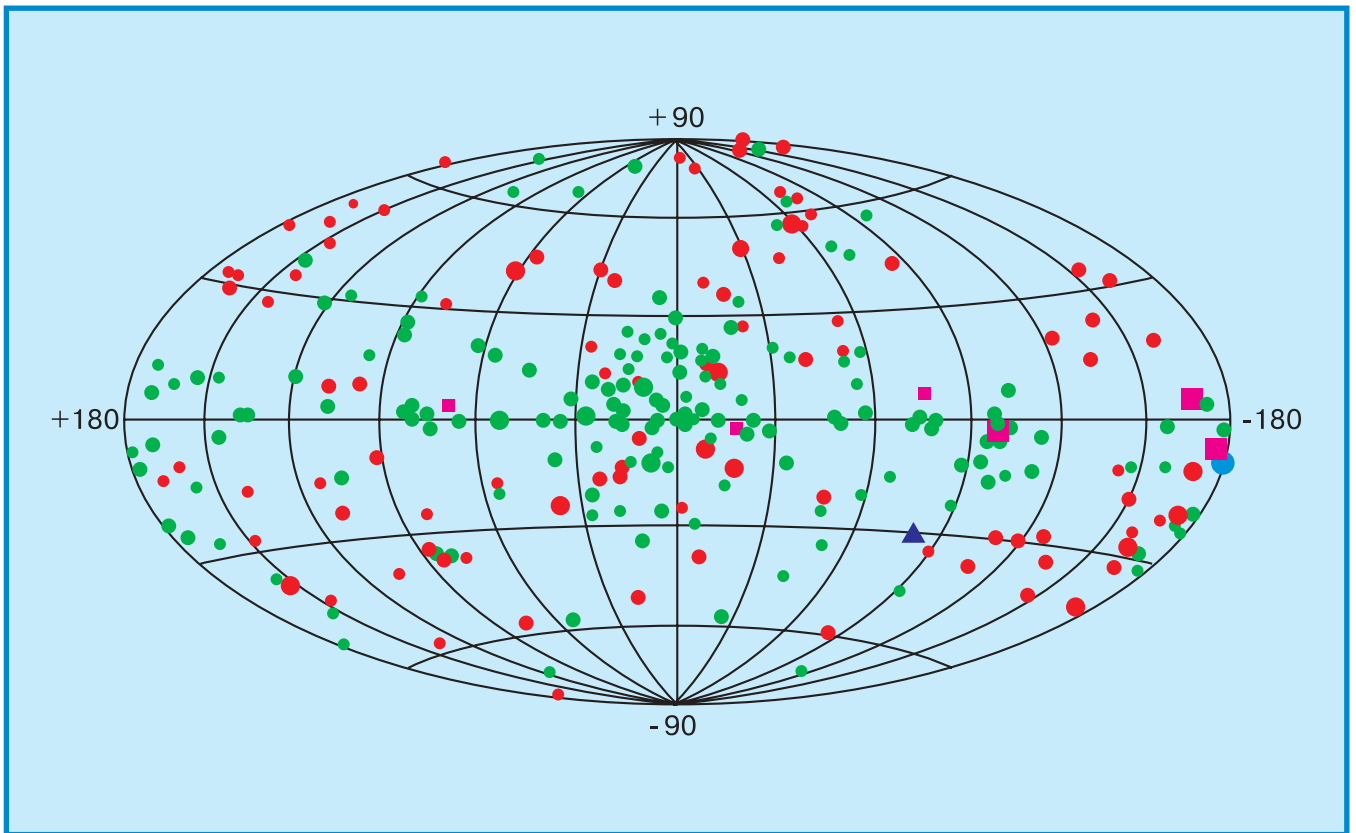


Распад  $\pi^0$ -мезонов.  
 $\pi^0$ -mesons decay.



Тормозное излучение электронов.  
Electrons bremsstrahlung.

## Компактные источники Compact sources



Компактные источники высокоэнергичного  
гамма-излучения согласно 3-му каталогу EGRET.

Compact high-energy gamma-ray sources  
according to the 3-d EGRET catalog.

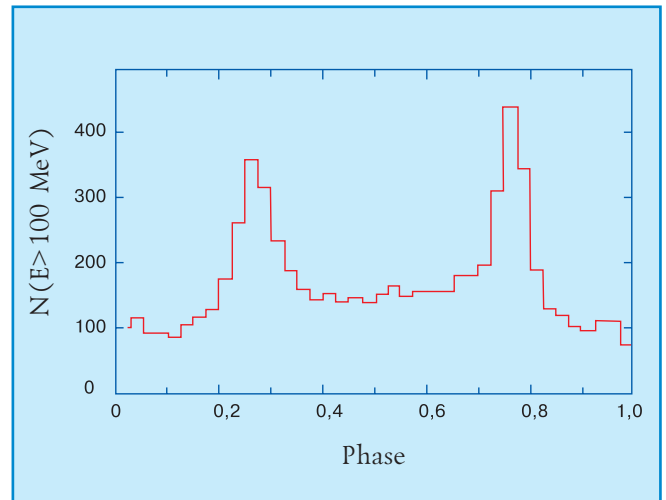
Пульсары	■	Pulsars
Активные ядра галактик	●	Active galactic nuclei
Большое Магелланово Облако	▲	Large Magellanic Cloud
Неидентифицированные источники	●	Unidentified sources
Солнечные вспышки	●	Solar flares

## Пульсары

Одиночные пульсары используют вращательную энергию для своей светимости. У поверхности вращающейся нейтронной звезды с сильным дипольным магнитным полем индуцируется электрическое поле квадрупольного типа благодаря действию униполярного генератора:  $E = v \times B / c$ . В этом электрическом поле происходит сильное ускорение частиц, сопровождаемое каскадным рождением  $e^+ e^-$  пар. При их движении вдоль искривленных магнитных силовых линий возникает магнитотормозное излучение изгибного типа, которое для  $\gamma$  (релятивистский фактор) порядка  $10^6$  и  $B = 10^{12}$  Гс приходится на жесткий гамма диапазон.

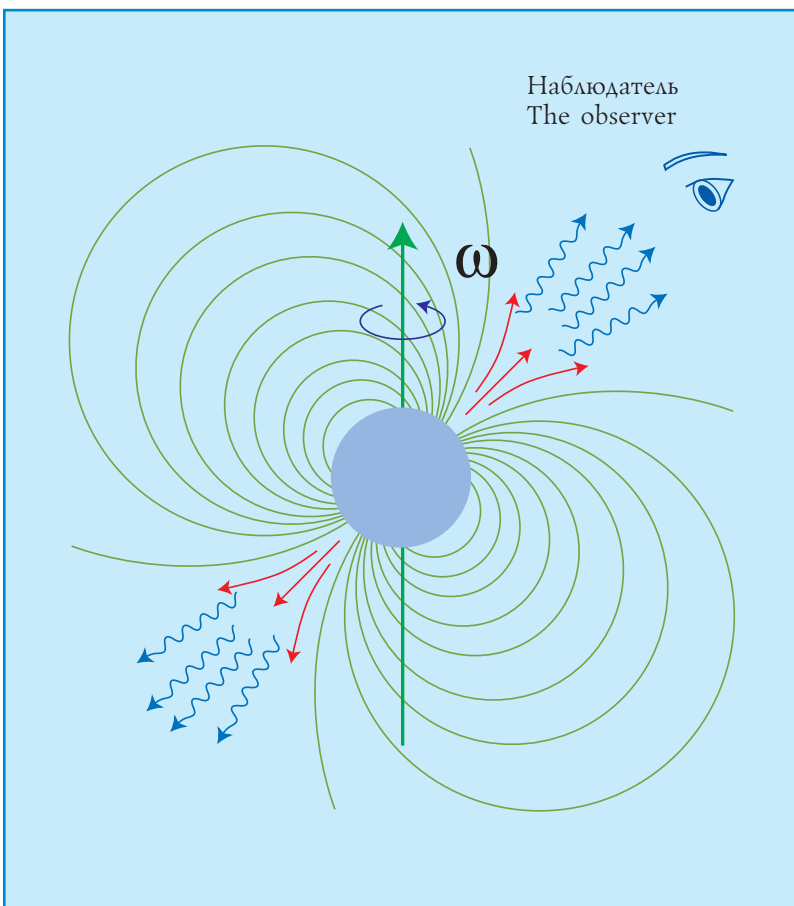
## Pulsars

Single pulsars use the rotational energy for their emission. At the surface of the rotating neutron star with a strong dipole magnetic field the quadrupole electrical field is induced due to the action of the unipolar generator:  $E = v \times B / c$ . In this electrical field strong particle acceleration takes place, which is accompanied by the cascade  $e^+ e^-$  pair production. Motion of the particles along the curved magnetic field lines results in the magnetobremstrahlung (curvature radiation), which for  $\gamma$  (relativistic factor) of the order of  $10^6$  and  $B = 10^{12}$  Gauss produces hard gamma quanta.



Фазовая кривая пульсара Geminga по данным ERGET.

Geminga light curve according to ERGET data.



Схематическая модель пульсара как вращающейся нейтронной звезды с наклонным дипольным магнитным полем.

Schematic model of the pulsar as a rotating neutron star with an inclined dipole magnetic field.

## Активные ядра галактик

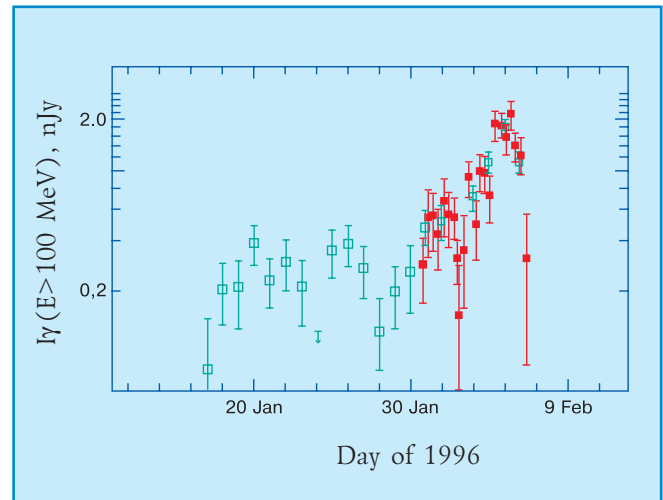
Жесткое излучение активных ядер галактик наиболее вероятно идет от релятивистских выбросов, которые наблюдаются в значительном числе этих объектов. В центре активных ядер (а возможно и во всех ядрах галактик) имеется сверхмассивная черная дыра, окруженная аккреционным диском, который является источником энергии этих объектов. Механизм жесткого излучения от этих объектов не вполне ясен. Это может быть синхротронное излучение или обратное комптоновское рассеяние электронов очень высоких или сверхвысоких энергий. Некоторый вклад могут давать распады нейтральных пионов, образующихся при столкновении релятивистских протонов. Очень важной является проблема ускорения частиц в выбросах из активных ядер: время высвечивания электронов в выбросах по оценкам много меньше времени их существования. Механизмы ускорения часто основываются на образовании ударной волны при движении выброса в газе, окружающем ядро, и ускорении частиц на ударном фронте, либо возможно электродинамическое ускорение частиц в электрическом поле вокруг сгустков, на которые обычно разбиваются выбросы.

## Active Galactic Nuclei

The hard gamma radiation from AGN is produced most probably in the relativistic jets observed in the considerable part of these objects. In the center of AGN (and may be of all other galaxies) there is a supermassive black hole surrounded by the accretion disk, which is the source of the energy in these objects. The mechanism of the hard gamma radiation from these objects is not quite clear: synchrotron radiation, as well as inverse compton radiation of VHE and UHE electrons is possible. Some input may come from the neutral pion production in the collisions of relativistic protons and their subsequent decay. The problem of particle acceleration in the AGN jets is very important: the time of the electron energy losses in the jets is usually much less than their life time. These mechanisms are based on the acceleration on the shock formed during the jet motion in the circumnuclear gas, or due to electrodynamic acceleration in the electrical field around separate bubbles of the jets.

Схема генерации потоков электромагнитного излучения с двух сторон вращающегося намагниченного аккреционного диска за счет действия эффекта униполярного динамо.

Sketch of the electromagnetic outflows from the two sides of a rotating magnetized accretion disk owing to the unipolar dynamo action.

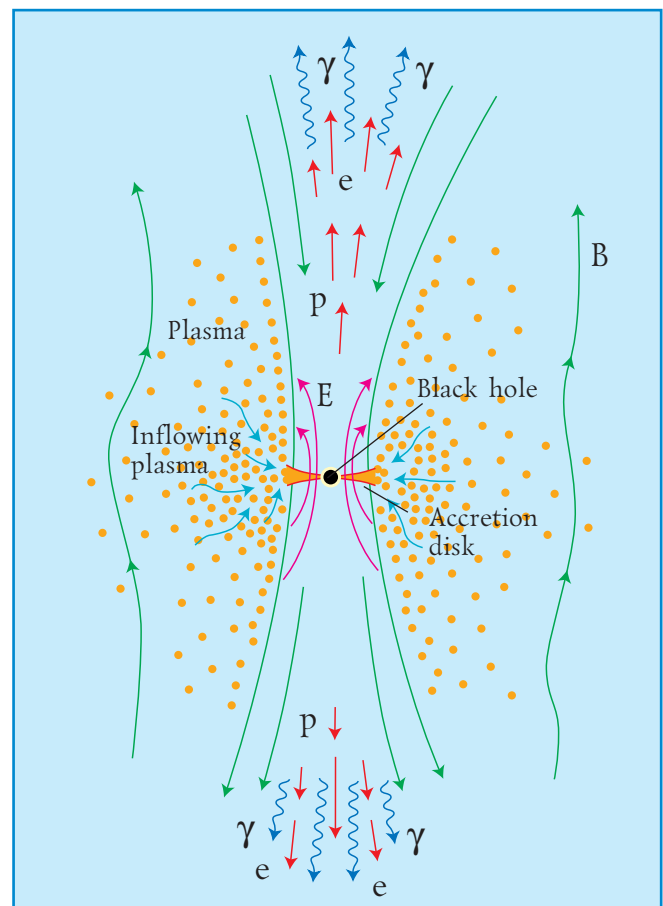


Резкое возрастание потока гамма излучения с энергией  $>100$  МэВ от блазара 3C 279, зарегистрированное телескопом EGRET.

Пустые квадраты — среднее за сутки, сплошные квадраты — среднее за 8 часов.

Sharp outburst of the gamma-ray flux with the energies  $>100$  MeV from the blazar 3C 279 registered by the EGRET telescope.

Empty squares — 1 day average, filled squares — 8 hr average.



## Гамма-всплески

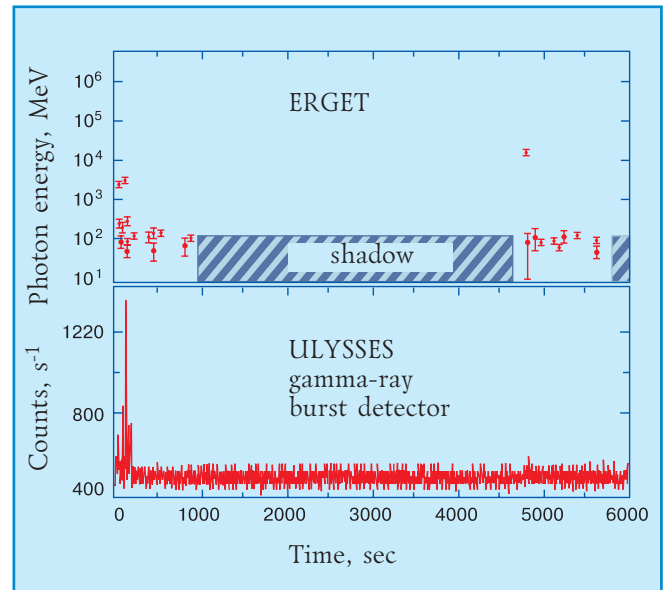
Природа космических гамма всплесков (КГВ) остается неясной, однако имеются свидетельства в пользу их космологического происхождения при красных смещениях вплоть до 3–4. В космологических КГВ выделяется огромное количество энергии, которое представляется в виде расширяющегося огненного шара или движущихся с ультрарелятивистскими скоростями шаровых выбросов. Происхождение жесткого гамма излучения от КГВ обычно связывается со взаимодействием «шара» с окружающей плазмой.

Загадкой остается жесткое гамма послесвечение, которое длится много дольше основного мягкого гамма всплеска. Для объяснения этого явления предполагалось специальное распределение вещества вокруг источника.

## Gamma-ray bursts

Nature of the cosmic gamma-ray bursts (GRB) is still not clear, but there are arguments in favor of their cosmological origin with the red shifts up to 3–4. Cosmological GRB produce huge amount of energy, which is considered in the form of an expanding fireball, or rapidly (ultrarelativistically) moving cannon balls. The origin of the hard gamma radiation is usually connected with the interaction of the «ball» with the surrounding plasma.

A puzzle is the hard gamma ray afterglow, which lasts much longer than the main soft GRB. To explain this phenomenon a specific distribution of matter around the source was considered.



Гамма всплеск 17 февраля 1994 г., зарегистрированный гамма телескопом высоких энергий EGRET (вверху) и гамма детектором низких энергий на ULYSSES (внизу). Заметьте, что высокоэнергичное гамма излучение продолжается до 1.5 часов после начального всплеска в области малых энергий.

The gamma-ray burst on February 17, 1994, registered by the EGRET high energy gamma-ray telescope (upper panel) and the ULYSSES low energy gamma-ray detector (lower panel).

Note that the high energy emission lasts up to 1.5 hours after the initial low energy outburst.

- Вспышка «гиперновой»?
- Быстрое извлечение энергии вращения черной дыры вследствие взаимодействия с окружающим замагниченным диском или тором?
- Hypernova?
- Rapid extraction of rotational energy of a black hole by means of interaction with surrounding magnetized disk or torus?
- . . .

Природа неизвестна.

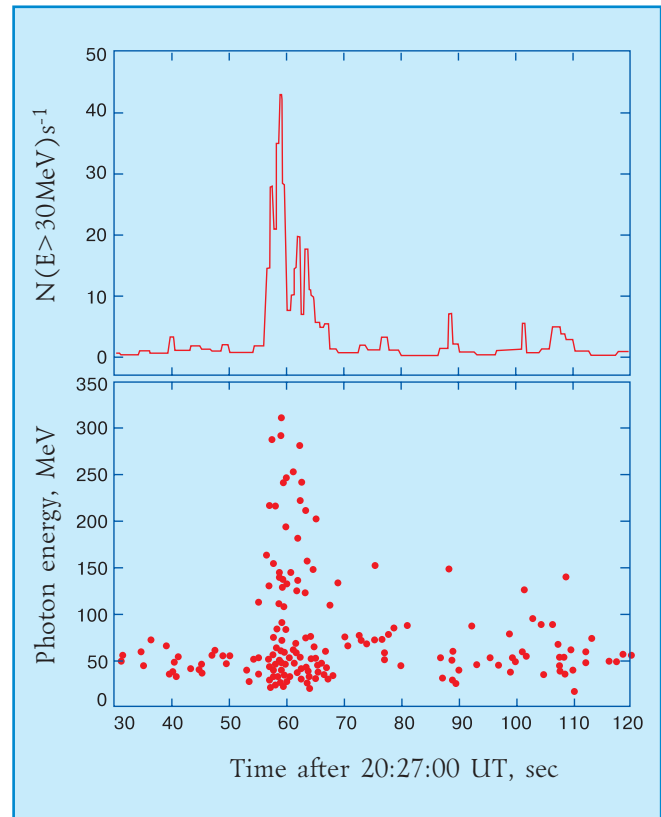
Nature is unknown.

## Солнечные вспышки

Пересоединение магнитных полей движущихся магнитных структур на поверхности Солнца приводит к появлению токовых слоев и возбуждению плазменных волн. Протоны и электроны ускоряются возникающими электростатическими полями и плазменными волнами до энергий в сотни и тысячи МэВ. Взаимодействуя с веществом хромосферы и фотосферы Солнца, ускоренные заряженные частицы рождают высокоэнергичные фотоны.

## Solar flares

Reconnection of magnetic fields of the moving magnetic structures at the Sun surface results in formation of current layers and generation of plasma waves. Electrons and photons are accelerated by the electrostatic fields and the plasma waves to energies of hundreds and thousands MeV. Interacting with the matter of the Sun chromosphere and photosphere the accelerated charged particles generate the high energy photons.

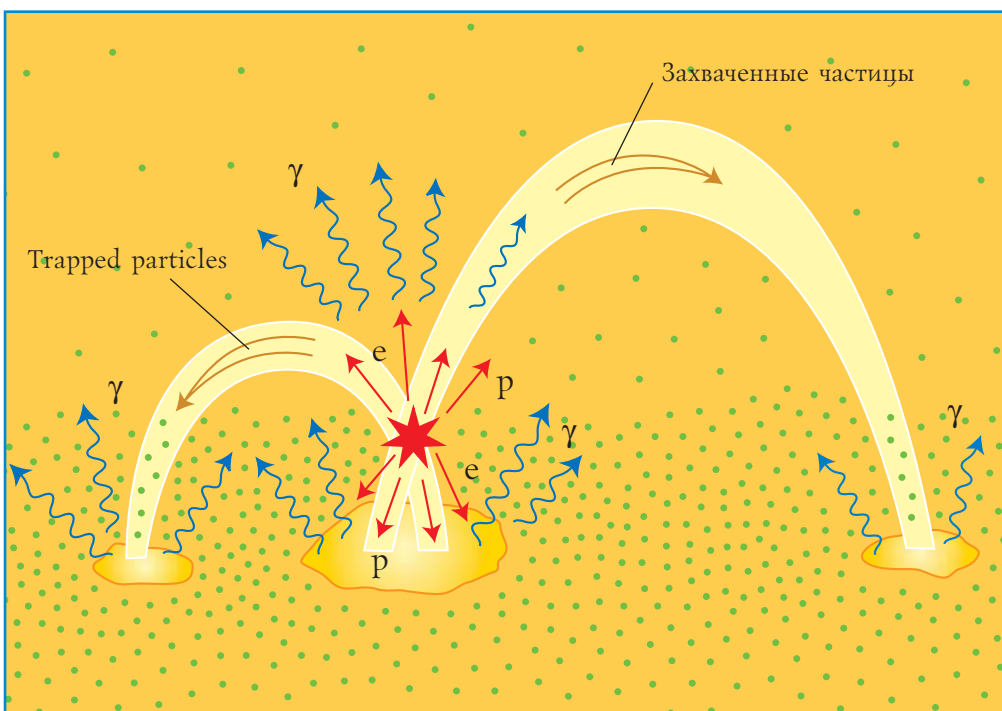


Поток фотонов с энергией до 300 МэВ от солнечной вспышки 26.03.1991, зарегистрированной гамма-телескопом ГАММА-1.

The flux of photons with energies up to 300 MeV from the solar flare on 26.03.1991 registered by the gamma-telescope GAMMA-1.

Схематическая модель солнечной вспышки.

Schematic model of the solar flare.

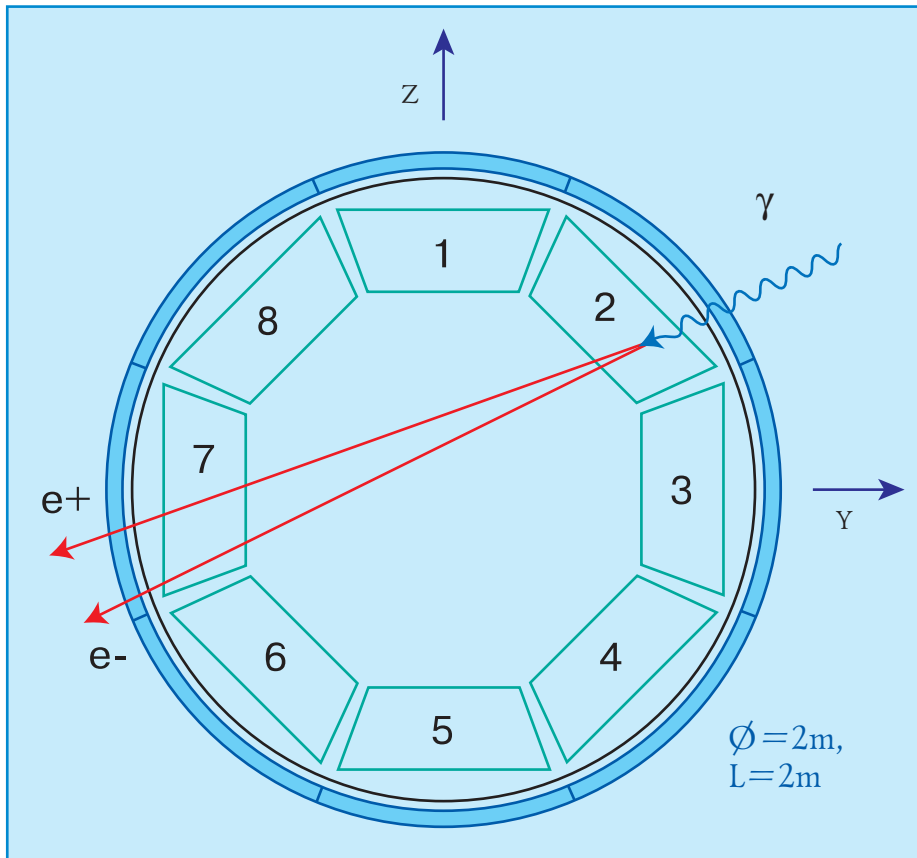




# УСТРОЙСТВО ТЕЛЕСКОПА

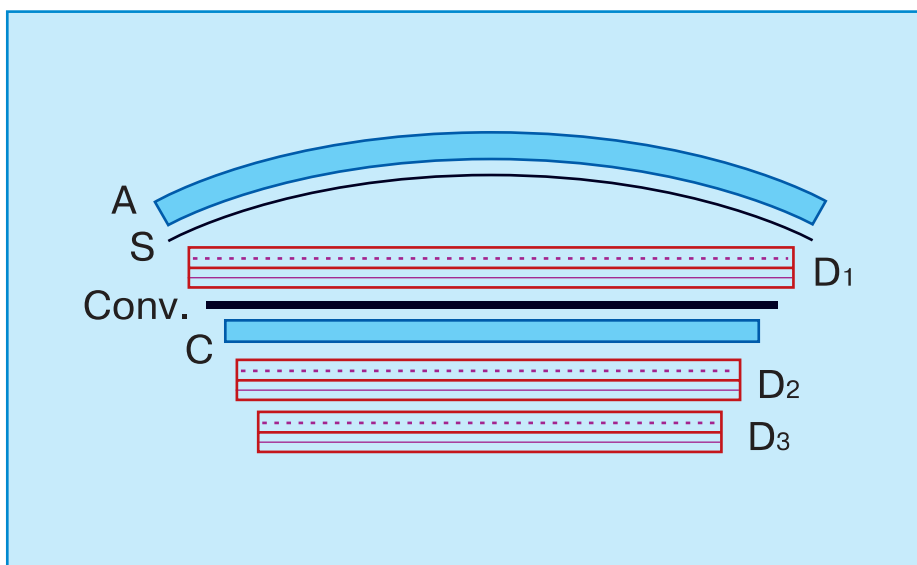
## THE TELESCOPE DESIGN

### Общий вид Principal diagram



1-8 — Детектирующие блоки  
Detecting blocks

### Детектирующий блок Detecting block



A — Внешний  
сцинтиляционный счетчик  
Outer scintillation counter

S — стенка гермоконтейнера  
Sealed volume skin

Conv — Конвертор  
Converter

C — Внутренний  
сцинтиляционный счетчик  
Inner scintillation counter

D1, D2, D3 — двухслойные  
дрейфовые камеры  
Double layer drift chambers

## ЛОГИКА ОТБОРА СОБЫТИЙ

### LOGIC OF THE EVENTS SELECTION

#### Логика мастерного сигнала

#### Logic of the master signal

Для любой комбинации секций  $i$  и  $j$  при  $j \neq i-1, i, i+1$

$$M = \text{TOF}(C_i \rightarrow C_j) \times A_j(\geq 2\text{mip}) \times \bar{A}_{i-1} \times \bar{A}_i \times \bar{A}_{i+1}$$

$\text{TOF}(C_i \rightarrow C_j)$  — сигнал системы измерения времени пролета, соответствующий прохождению релятивистской заряженной частицы от  $C_i$  к  $C_j$ .

$A(\geq 2\text{mip})$  — сигнал счетчика  $A$ , соответствующий по амплитуде регистрации двух или более минимально ионизирующих частиц.

$\bar{A}$  — отсутствие сигнала в счетчике  $A$ .

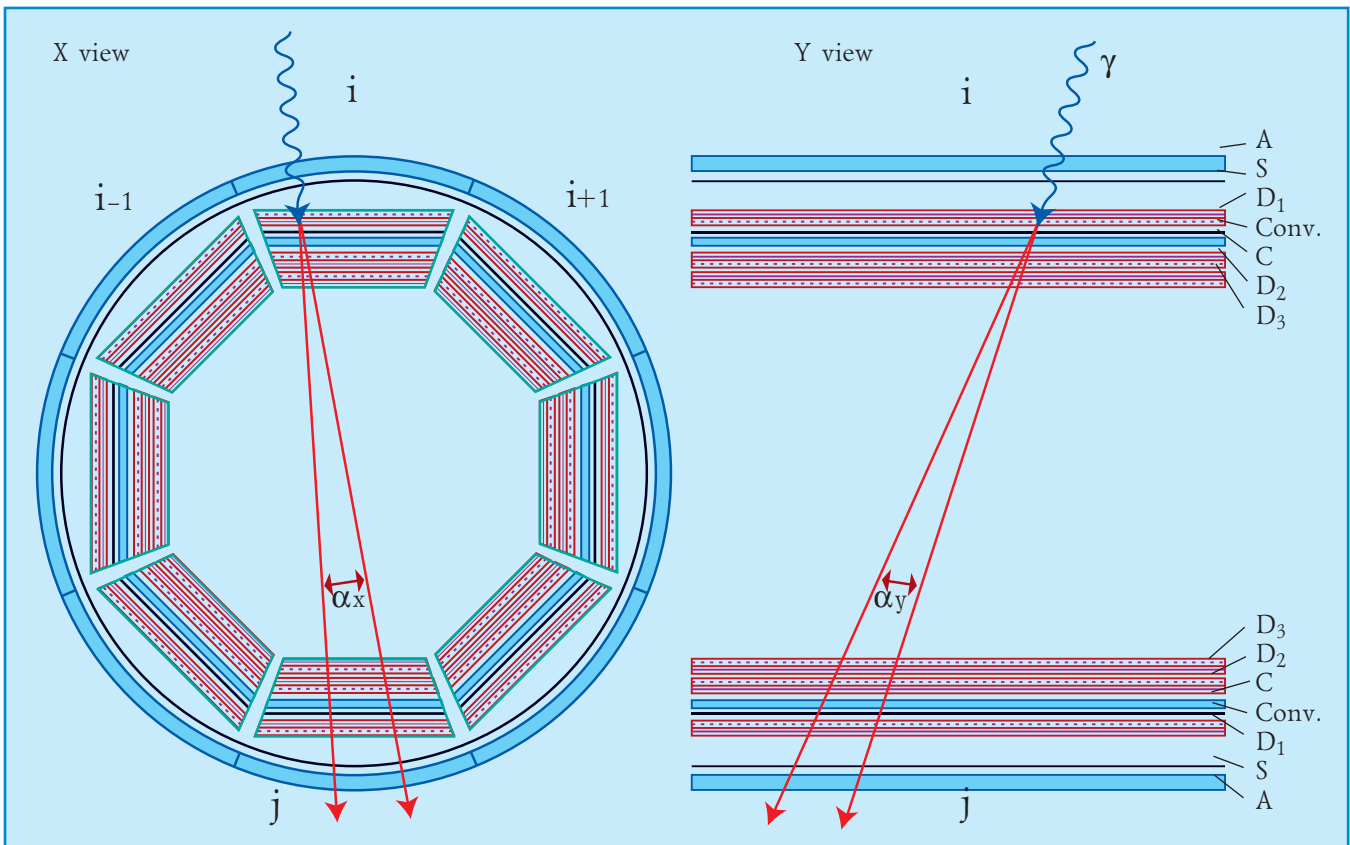
For any combination of sections  $i$  and  $j$  when  $j \neq i-1, i, i+1$

$$M = \text{TOF}(C_i \rightarrow C_j) \times A_j(\geq 2\text{mip}) \times \bar{A}_{i-1} \times \bar{A}_i \times \bar{A}_{i+1}$$

$\text{TOF}(C_i \rightarrow C_j)$  — signal of the time-of-flight system corresponding to passage of a relativistic charged particle from  $C_i$  to  $C_j$ .

$A(\geq 2\text{mip})$  — a signal of the  $A$  counter corresponding by its amplitude to registration of two or more minimum ionizing particles.

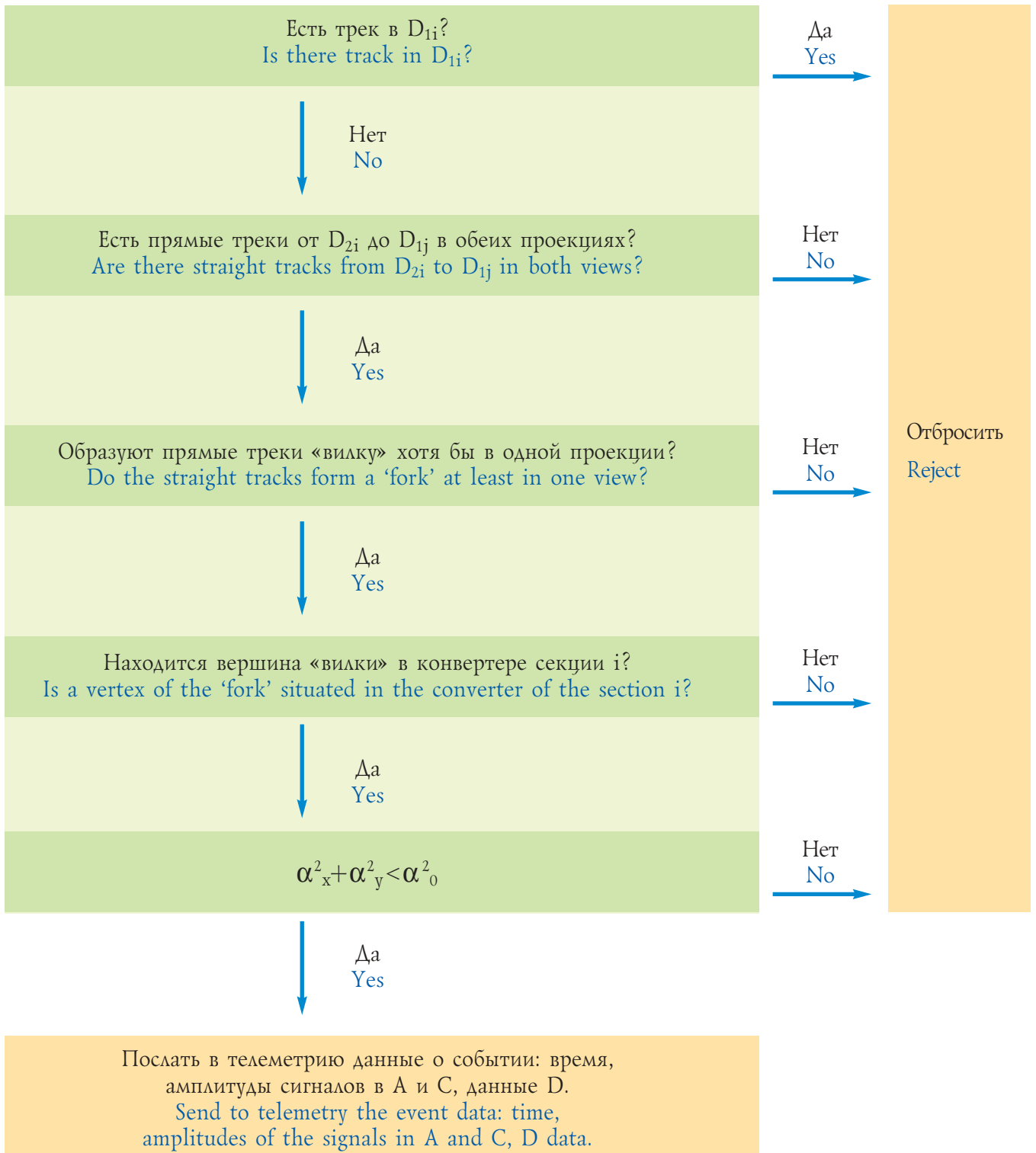
$\bar{A}$  — absence of a signal in the  $A$  counter.



## Отбор событий по данным дрейфовых камер Selection of events based on the drift chambers data

Мастерный сигнал управляет считыванием данных с дрейфовых камер в бортовой процессор, который отбирает события по виду «картинки» в дрейфовых камерах секций  $i$  и  $j$ .

The master signal commands reading of the drift chambers data into the onboard processor which selects events by the 'picture' in the drift chambers of  $i$  and  $j$  sections.



CYGAM, в отличие от традиционных телескопов, не имеет специального детектора энергии и поэтому не может измерять энергию каждого фотона. Этот недостаток — цена за широкое поле зрения, но эта цена не кажется слишком высокой, поскольку

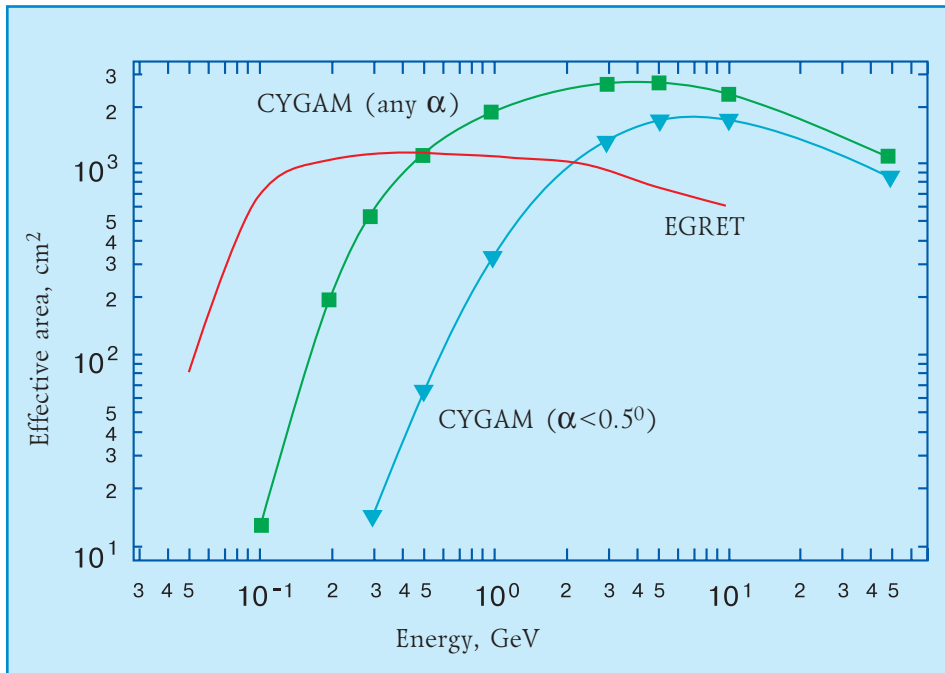
- Даже при наличии детектора энергии энергетический спектр источника может быть детально измерен только для небольшого числа наиболее ярких источников. Для большинства зарегистрированных ERGET источников спектр характеризуется лишь показателем в предположении степенной формы спектра.
- Физические процессы, ответственные за генерацию высокоэнергичного гамма-излучения, не могут приводить к появлению узких линий или резких нерегулярностей в энергетических спектрах компактных источников, для выявления которых требовалось бы высокое энергетическое разрешение.
- Данные по энергетическим спектрам не играли до сих пор существенной роли при идентификации источников.
- В эксперименте CYGAM для источников с  $I_\gamma(>1\text{ГэВ}) > 10^{-8}\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$  показатель степенного спектра может быть оценен по распределению углов раскрытия пар.

CYGAM, unlike the traditional telescopes, does not have a special energy detector and can not measure energy of each registered photon. This drawback is a price for the large field of view but the price does not seem to be too high because

- Even in presence of the energy detector the energy spectrum may be measured in detail only for a few brightest sources. For most of the sources registered by ERGET the energy spectra were described by an index of the supposed power-law spectrum.
- The physical processes responsible for the high energy gamma-ray emission can not result in narrow lines or sharp irregularities in the energy spectra of compact sources for revelation of which good energy resolution is needed.
- Till now the data on the energy spectra had not been playing important role in the registered sources identification.
- In the CYGAM experiment for the sources with  $I_\gamma(>1\text{ГэВ}) > 10^{-8}\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$  the power-law spectrum index may be estimated from the pair opening angles distribution.

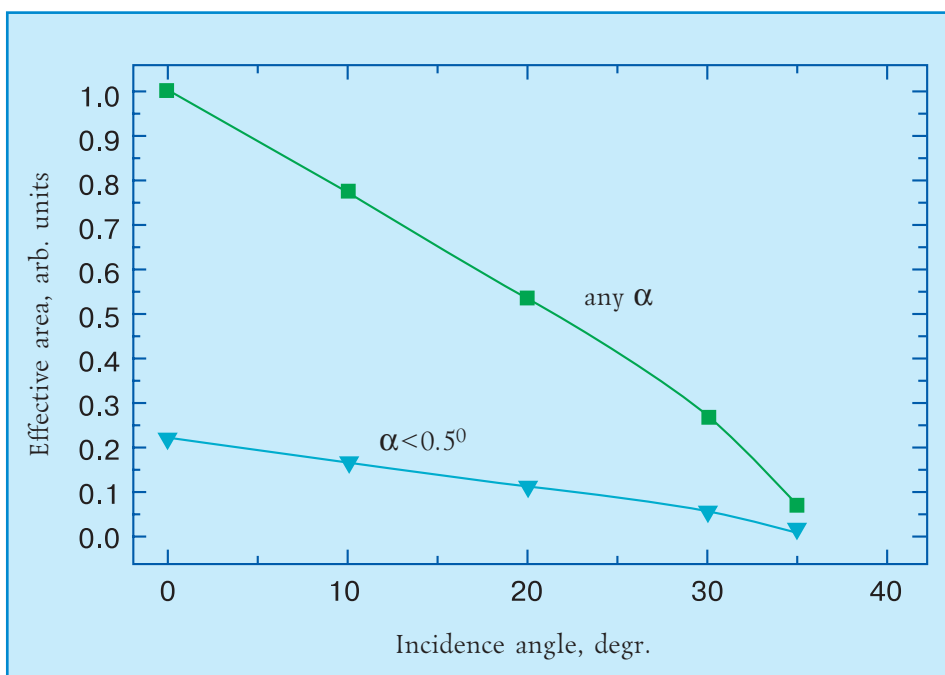
# ХАРАКТЕРИСТИКИ CYGAM ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

## CYGAM CHARACTERISTICS ACCORDING TO RESULTS OF MONTE-CARLO SIMULATIOUS



Эффективная площадь как функция энергии для нормального к оси X падения. Зеленая и голубая кривые — CYGAM (квадраты — без ограничений на  $\alpha$ , треугольники —  $\alpha < 0,5^\circ$ ); красная кривая — EGRET.

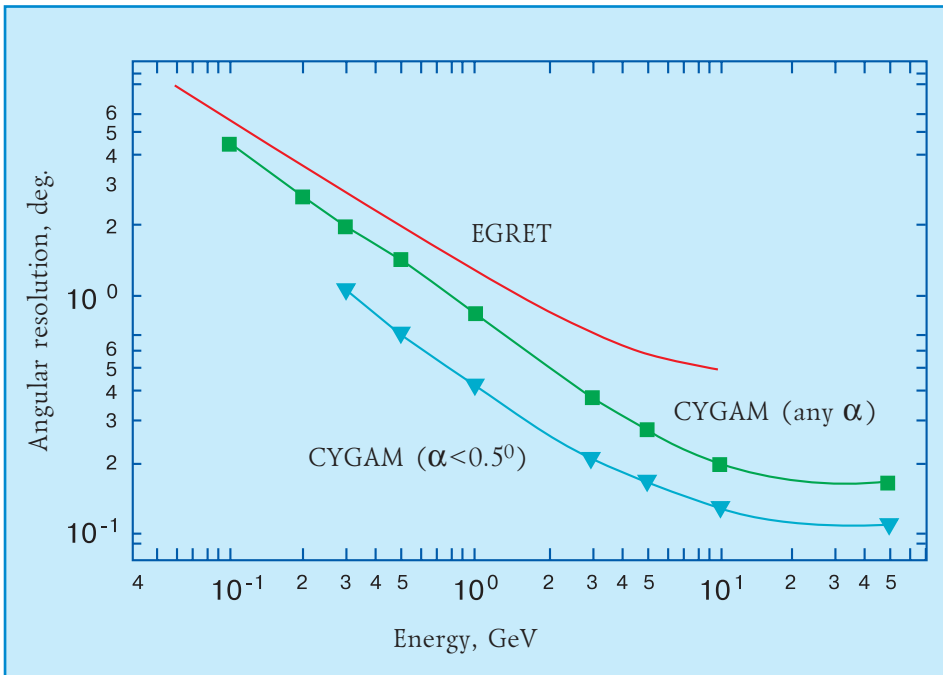
Effective area versus photon energy for normal incidence. Green and blue curves — CYGAM telescope (squares — no constraints on the angle  $\alpha$ , triangles —  $\alpha < 0.5^\circ$ ); red curve — EGRET telescope.



Эффективная площадь как функция угла падения параллельного потока относительно оси X (квадраты — без ограничений на  $\alpha$ , треугольники —  $\alpha < 0,5^\circ$ , показатель спектра  $\gamma=2$ )

Effective area versus photon incidence angle to relative the longitudinal telescope axis (squares — no constraints on the angle  $\alpha$ , triangles —  $\alpha < 0.5^\circ$ , spectral index  $\gamma=2$ ).

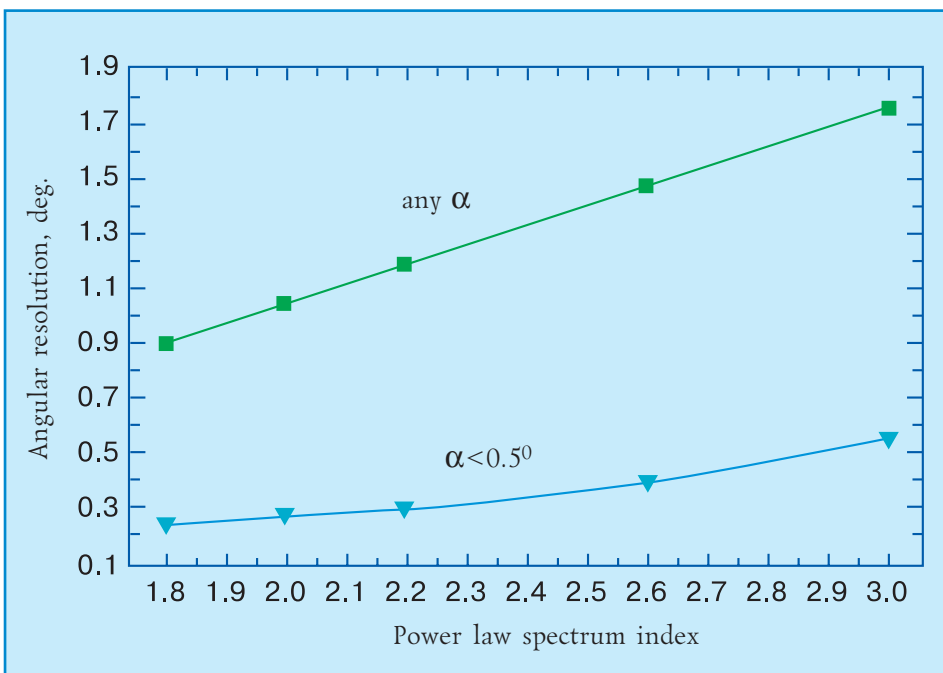
$\alpha$  — угол раскрытия  $e^-e^+$  пары  
 $\alpha$  — the  $e^-e^+$  pair opening angle



Угловое разрешение как функция энергии для нормального к оси X падения.  
Зеленая и голубая кривые — CYGAM (квадраты — без ограничений на  $\alpha$ , треугольники —  $\alpha < 0,5^\circ$ ); красная кривая — ERGET.

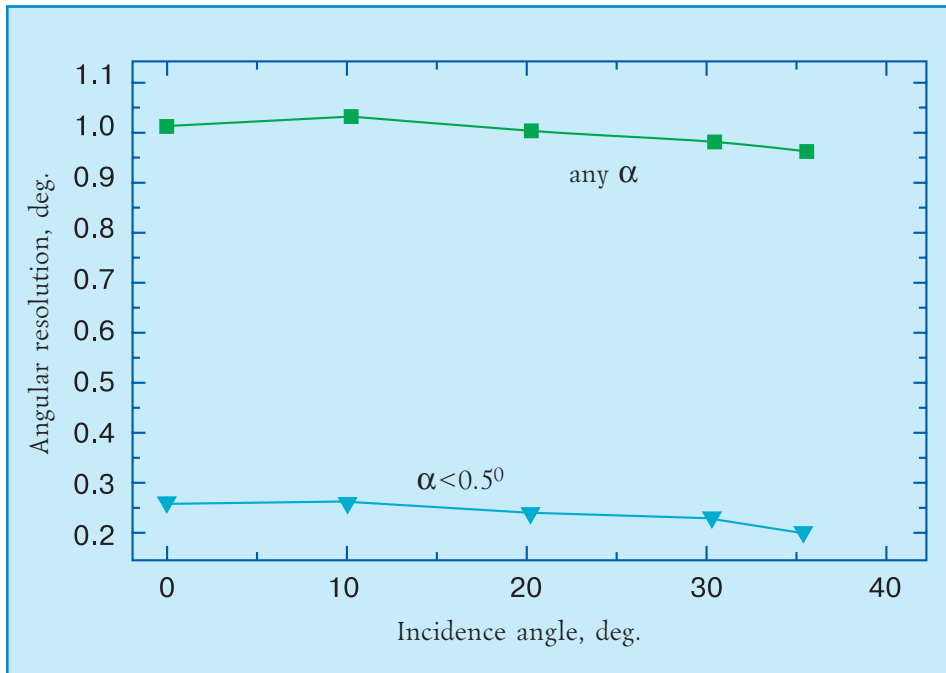
Angular resolution versus photon energy for normal incidence.

Green and blue curves — CYGAM telescope (squares — no constraints on the angle  $\alpha$ , triangles —  $\alpha < 0,5^\circ$ ); red curve — ERGET telescope.



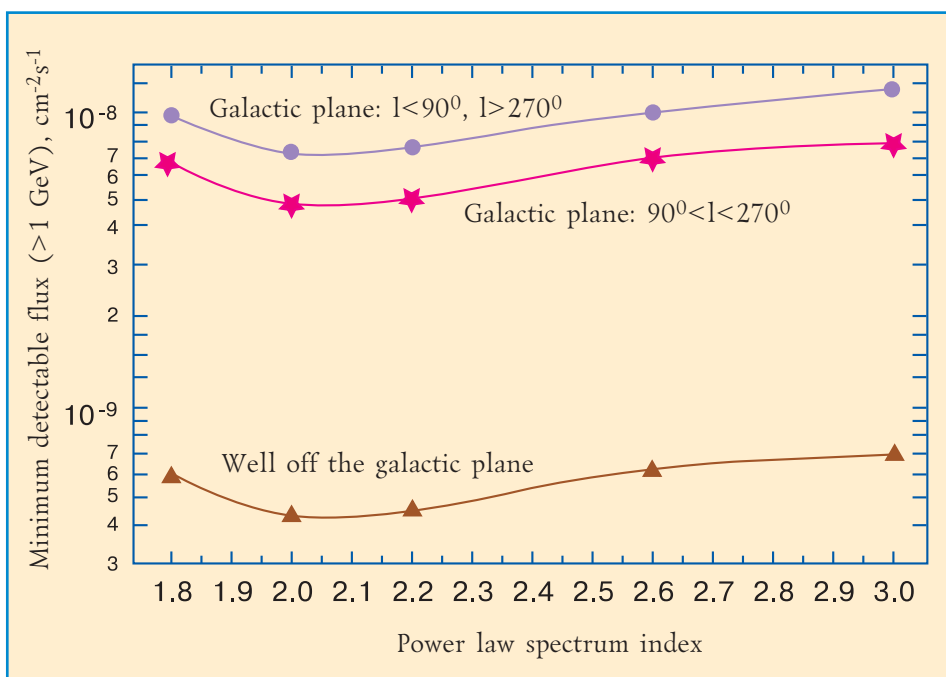
Угловое разрешение для нормального к оси X падения как функция показателя степенного спектра (квадраты — без ограничений на  $\alpha$ , треугольники —  $\alpha < 0,5^\circ$ ).

Angular resolution for normal to the axis X incidence versus source power law spectrum index (squares — no constraints on the angle  $\alpha$ , triangles —  $\alpha < 0,5^\circ$ ).



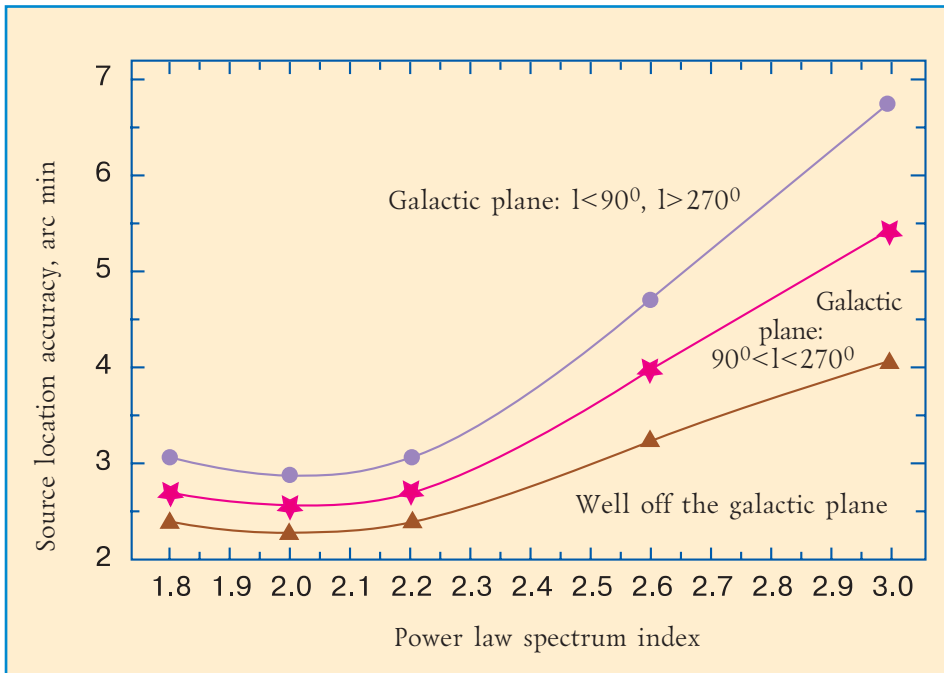
Угловое разрешение как функция угла падения параллельного потока относительно оси X (квадраты — без ограничений на  $\alpha$ , треугольники —  $\alpha < 0,5^\circ$ , показатель спектра  $\gamma = 2$ )

Angular resolution versus photon incidence angle relative to the longitudinal telescope axis (squares — no constraints on the angle  $\alpha$ , triangles —  $\alpha < 0,5^\circ$ , spectral index  $\gamma = 2$ ).



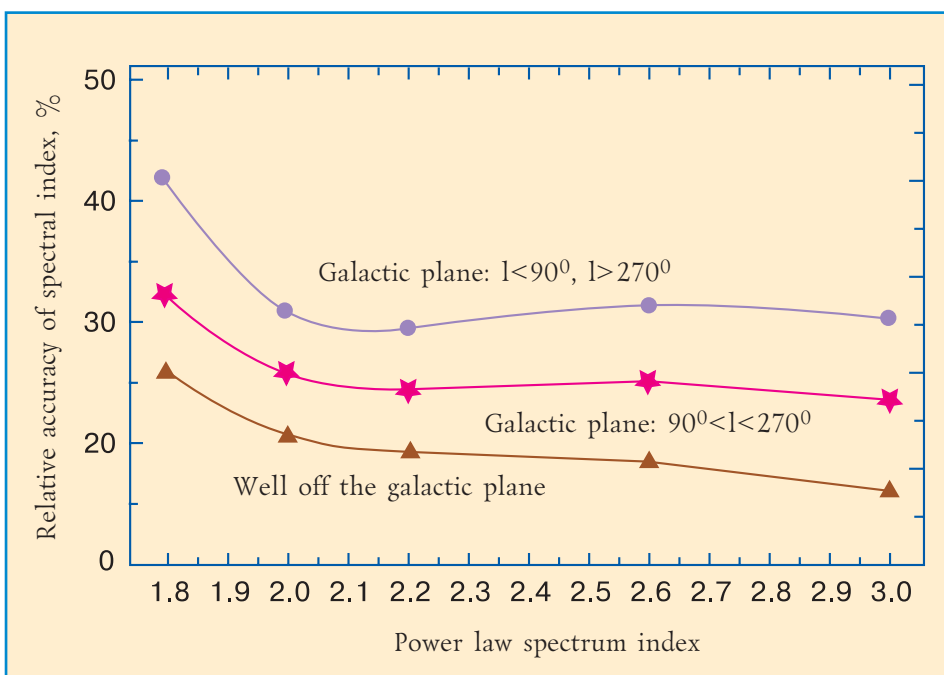
Минимальный детектируемый поток компактного источника как функция показателя степенного спектра источника ( $\alpha < 0,5^\circ$ , один год наблюдений).

Minimum detectable flux of a compact source versus the source power law spectrum index ( $\alpha < 0,5^\circ$ , one year of observation).



Точность локализации источника с потоком  $10^{-8} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  ( $E_\gamma > 1 \text{ ГэВ}$ ) за год наблюдений как функция показателя степенного спектра источника.

Source location capability for a year of observation for a source with the flux  $10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $E_\gamma > 1 \text{ GeV}$ ) versus the source power law spectrum index.



Относительная точность оценки показателя степенного спектра источника с потоком  $10^{-8} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  ( $E_\gamma > 1 \text{ ГэВ}$ ) за год наблюдений как функция показателя спектра.

Relative accuracy of spectral index estimation after a year of observation for a source with the flux  $10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $E_\gamma > 1 \text{ GeV}$ ) versus the source power law spectrum index.



---

## КАКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ МОЖНО ОЖИДАТЬ ЗА ГОД ПОЛЕТА CYGAM НА ВЫСОКОАПОГЕЙНОЙ ОРБИТЕ? WHAT RESULTS MAY ONE EXPECT AFTER A YEAR OF CYGAM FLIGHT IN THE HIGH APOGEE ORBIT?



- Распределение диффузного излучения Галактики с высоким угловым разрешением, позволяющее уточнить пространственное распределение протонов космических лучей в Галактике.
- Более чем 1000 компактных источников с точностью локализации в доли градуса и непрерывным мониторингом переменности их потоков.
- До 10 новых гамма пульсаров, излучающих в области очень высоких энергий.
- Несколько высокоэнергичных гамма-всплесков с точностью локализации в доли градуса.
- В годы максимума солнечной активности до 10 солнечных вспышек с очень высокоэнергичным гамма-излучением.



- Distribution of the Galaxy diffuse emission with high angular resolution allowing to refine the spatial distribution of the cosmic-ray protons in the Galaxy.
  - More than 1000 compact sources with the fraction of degree location accuracy and continuous monitoring of their flux time variation.
  - Up to 10 new gamma-ray pulsars emitting in the very high energy range.
  - Several high energy gamma-ray bursts with the fraction of degree localization accuracy.
  - In the years of high solar activity up to 10 solar flares with very high energy gamma emission.
-

