

1385

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

*Всероссийская школа по теор. ядер. физике. Сессия 6*

«Некоторые вопросы экспериментальных  
исследований в области физики высоких энергий»

В. Г. КИРИЛЛОВ-УГРЮМОВ, А. М. ГАЛЬПЕР, Б. И. ЛУЧКОВ

## ГАММА-АСТРОНОМИЯ (ТЕЗИСЫ)

(Конспекты лекций)

МОСКВА — 1975

539.1  
В85

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

— — —

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

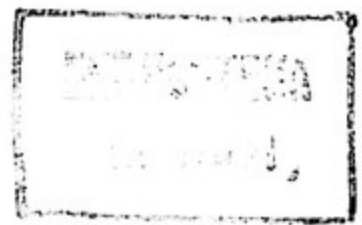
*Всесоюзная школа по теор. ядр. физике. Сессия 6*

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ  
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В.Г. Кириллов-Угрюмов, А.М. Гальпер, Б.И. Лучков

ГАММА-АСТРОНОМИЯ (ТЕЗИСЫ)

(Конспекты лекций)



Москва - 1975

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Гамма-астрономия — раздел внеатмосферной астрономии, исследующий космическое электромагнитное излучение с энергией квантов  $10^5 - 10^{13}$  эв. Отличительные особенности  $\gamma$  — диапазона:

а) Большая энергия кванта.

Гамма-кванты возникают в первичных актах взаимодействия высокоэнергичных частиц с веществом. Их регистрация дает сведения об основных процессах, протекающих в астрофизических объектах (звездах, туманностях, ядрах галактик).

б) Новые каналы генерации, не встречающиеся в других диапазонах электромагнитного спектра.

Распад  $\pi^0$  — мезонов, рождающихся в ядерных взаимодействиях, линейчатое  $\gamma$  — излучение, возникающее в ядерных реакциях и при распаде возбужденных ядер, электронно-позитронная аннигиляция.

в) Высокая проникающая способность.

Вселенная прозрачна для  $\gamma$  — квантов ( $E \approx 1 - 10^3$  мэв) вплоть до красных смещения  $z = 100 - 300$  (при концентрации межгалактического газа  $10^{-5} - 10^{-7}$  см $^{-3}$ ).

## П. ПРОЦЕССЫ ГЕНЕРАЦИИ $\gamma$ -КВАНТОВ

Гамма-кванты образуются при взаимодействии энергичных частиц (электронов, протонов, ядер) с веществом и излучением, при аннигиляции вещества с антивеществом, при радиоактивном распаде.

Основные процессы генерации космического  $\gamma$ -излучения (КГИ):

1. Тормозное излучение релятивистских электронов.

Энергетический спектр  $\gamma$ -квантов близок по форме к спектру излучающих электронов. При анизотропии потоков электронов возникает линейная поляризация  $\gamma$ -излучения.

2. Магнитотормозное (синхронное) излучение релятивистских электронов.

Спектр излучения степеней, спектральные индексы  $\gamma$ -излучения  $\alpha_\gamma$  и электронов  $\alpha_e$  связаны соотношением  $\alpha_\gamma = \frac{\alpha_e - 1}{2}$ . Возможна линейная поляризация  $\gamma$ -излучения.

3. Комптоновское рассеяние фотонов на релятивистских электронах.

Спектр такой же, как у синхротронного  $\gamma$ -излучения. Линейная поляризация  $\gamma$ -излучения при рассеянии поляризованных фотонов.

4. Электронно-позитронная аннигиляция:  $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$

Линейчатое  $\gamma$ -излучение с энергией  $E = m_e c^2 = 0,51$  Мэв.

5. Рождение и распад нейтральных пионов в ядерных взаимодействиях:  $N + N \rightarrow N' + N' + \pi^0$ ;  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$

Непрерывный спектр с максимумом при  $E = \frac{m_{\pi^0} c^2}{2} = 67,5$  Мэв. При больших энергиях спектр приблизительно степенной с показателем, близким к показателю спектра космических лучей (рис. 1).

6. Нуклон-антинуклонная аннигиляция:  $N + \bar{N} \rightarrow \pi, K$ ;

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

Спектр подобен спектру, возникающему в процессе 5, но отличается более крутым падением при больших и малых энергиях и обрывом при  $E = 920$  Мэв (рис. 1).

Редкий канал аннигиляции:  $p + \bar{p} \rightarrow 2\gamma$ ,  $< 10^{-4}$  от обычного "сильного" канала. Линейчатое излучение с энергией  $E = m_p c^2 \approx 1$  Гэв.

7. Ядерные реакции с образованием  $\gamma$ -квантов.

Например,  $p + n \rightarrow d + \gamma$ ,  $E = 2,23$  Мэв.

8. Излучение возбужденных ядер.

Линейчатый спектр.

Поток  $\gamma$ -квантов, образованных на пути  $L$ , равен

$$J_{\gamma}(E) = N(L) \bar{\sigma}, \text{ где } N(L) -$$

число атомов (ядер, фотонов - в зависимости от рассматриваемого процесса) на длине  $L$ ,  $\bar{\sigma}$  - усред-

ненное по спектру генерирующих частиц сечение рождения  $\gamma$ -квантов.

### Ш. ОСНОВНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ

Исследование космического гамма-излучения (КГИ) — неотъемлемая часть современной астрофизики. Вместе с другими диапазонами электромагнитного спектра дает правильное представление о процессах, протекающих в разных частях Вселенной.

КГИ состоит из изотропного диффузного (метagalактического) потока, анизотропного потока, исходящего от Галактики и занимающего на небе область Млечного Пути, и отдельных дискретных источников, как галактической, так и внегалактической природы.

Основные астрофизические направления, в развитии которых  $\gamma$ -астрономия может сыграть важную роль :

1. Сведения с межзвездной и межгалактической среде.

Потоки  $\gamma$ -квантов несут информацию о плотности вещества, антивещества, излучения и магнитного поля в источниках и в космическом пространстве. Наиболее ценные сведения могут дать "пионные"  $\gamma$ -кванты, прямо связанные с плотностью газа (и антигаза), с его составом и пространственным распределением. Может быть исследована спиральная структура Галактики и получены сведения о межгалактическом газе.

Проблема молекулярного водорода. Данные радиоастрономии, в частности наблюдения на  $\lambda = 21$  см, дали сведения об атомарном водороде и лишь косвенно (например, по линиям излучения CO) о количестве  $H_2$  в составе пылевых облаков. Наиболее полные сведения о плотности водорода (во всех формах, в том числе и в форме  $H_2$ ) дадут наблюдения "пионных"  $\gamma$  - квантов.

## 2. Проблема антивещества

Экспериментальная и теоретическая ситуация с существованием где-либо во Вселенной макроскопических количеств антивещества (АВ) неопределенны. Традиционная нестационарная космология считает, что изначально  $B \approx AB$ , т.к. иначе возникла бы "радиационная катастрофа" и безразмерная энтропия была бы  $\sim 10^{18}$  вместо  $10^9$  по наблюдениям реликтового радиоизлучения.

Однако в последнее время появились нестационарные симметричные ( $AB = B$ ) модели с разделением  $B$  и  $AB$  на раннем этапе эволюции (Альвена - Клейна, Омне - Харрисона).

Регистрация  $\gamma$  - квантов позволит обнаружить антивещество по аннигиляции на границах  $B$  и  $AB$ , т.к. значительная доля массы и энергии  $B$  и  $AB$  переходит в поток

$\gamma$  -квантов: в одном акте  $H\bar{H}$  - аннигиляции образуются два  $\gamma$  -кванта с  $E = 0,51$  Мэв и в среднем 3,3  $\gamma$  - кван-

та с  $E \approx 190$  Мэв, т.е. кпд  $\gamma$ -излучения 34 %.

### 3. Сведения о космических лучах.

Так как  $\gamma$ -излучение генетически связано с космическими лучами, исследования КГИ дают сведения о космических лучах в разных частях Галактики, в межгалактическом пространстве и в других галактиках. В то время, как сведения об электронной компоненте можно получить и из радио и рентгеновской астрономии, сведения о протонно-ядерной компоненте — происхождение космических лучей, их источники (процессы генерации), распространение — можно получить только из данных  $\gamma$ -астрономии ("пионные"  $\gamma$ -кванты).

#### а) Происхождение космических лучей.

Две противоположные, галактическая и метagalактическая, гипотезы происхождения космических лучей.

Идея Гинзбурга : измерить потоки  $\gamma$ -квантов от Большого и Малого Магелановых облаков (БМО, ММО). Согласно метagalактической гипотезе ( $\mathcal{E}_{\text{кл}} \approx 1$  эв/см<sup>3</sup> во всей Метagalактике) потоки  $\gamma$ -квантов с  $E \gtrsim 100$  Мэв равны

$$F_{\text{БМО}} \approx 2 \cdot 10^{-7} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек}}, \quad F_{\text{ММО}} \approx 1 \cdot 10^{-7} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек}}.$$

Если измеренные потоки окажутся меньше, метagalактическая гипотеза неверна.

## б) Источники космических лучей.

Возможные источники : вспышки сверхновых, пульсары, оболочки сверхновых, галактическое ядро – в Галактике, сейфертовские галактики, квазары, галактики типа BL Ящерицы – в Метагалактике.

Источники космических лучей должны наблюдаться как дискретные источники КГИ.

## 4. Свойства компактных астрофизических объектов.

Рентгеновское и  $\gamma$ -излучение возникает при аккреции вещества на компактные объекты (белые карлики, нейтронные звезды (НЗ), черные дыры (ЧД) ).

Тесные двойные системы с компактным объектом: НЗ – Her X-1, Cen X-3, ЧД – Cyg X-1, SMC X-1.

Определение гравитационного потенциала на поверхности НЗ по смещению линий  $\gamma$ -излучения представляет возможность изучения физических условий в источниках.

## 5. Гамма-астрономия и космология.

Высокая проникающая способность  $\gamma$ -излучения позволяет наблюдать "объекты" вплоть до  $z \approx 100$ , что соответствует "возрасту"  $t_0 \approx 2 \cdot 10^6$  лет ( $t_0 = \frac{1}{H} \left[ K - \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1} \right]$ ), где  $H = 50 \frac{\text{км}}{\text{сек. Мпс}}$  постоянная Хаббла,

к — коэффициент, зависящий от модели Вселенной).

Космологические  $\gamma$ -излучения — реликты ранних эпох развития Вселенной.

а) Эпоха образования галактик.

Период формирования галактик и начала генерации космических лучей. Реликтовое "пионное"  $\gamma$ -излучение, максимум в спектре которого приходится на  $E = \frac{67.5}{Z_2 + 1}$  Мэв, где  $Z_2 = 2 - 100$  — параметр красного смещения, соответствующий этой эпохе.

б) Эпоха аннигиляции.

Бариионно-симметричная модель Омне-Харрисона. Реликтовая аннигиляционная линия  $\frac{0.51}{Z_a + 1}$  Мэв и реликтовый аннигиляционный "пионный" спектр с максимумом при энергии  $\frac{67.5}{Z_a + 1}$  Мэв,  $Z_a$  — параметр красного смещения эпохи аннигиляции.

## 6. Сведения об эволюции звезд

Гамма-кванты от термоядерных реакций могут регистрироваться, если реакции происходят в оптически тонком слое: в наружных слоях вспыхивающих звезд или при взрыве сверхновых. В последнем случае идут, например, реакции  $C_6^{12} + C_6^{12} \rightarrow Mg_{12}^{24} + \gamma$ ,  $O_8^{16} + O_8^{16} \rightarrow S_{16}^{32} + \gamma$  которые позволят уточнить химический состав звезды. Химический состав звезд и процессы, происходящие во время вспышек, определяются также по характеристическому ядерному  $\gamma$ -излучению.

## 7. Исследование Солнца и планет

Солнечное  $\gamma$ -излучение характеризует состав и динамику фотосферы и хромосферы, процессы ускорения частиц

Гамма-альbedo планет – способ определения химсостава и структуры небесных тел.

### 1У. МЕТОДЫ $\gamma$ – АСТРОНОМИИ.

Гамма-кванты регистрируются по вторичным электронам и их излучению: комптоновские и фотоэлектроны, электронно-позитронные пары, черенковское излучение ШАЛ. Элементы  $\gamma$  – телескопов : конвертор, сцинтилляционные, полупроводниковые, черенковские и пропорциональные счетчики, искровые камеры, фотоэмульсии. Гамма-телескопы характеризуются направленностью, угловым ( $\Delta\theta$ ) и энергетическим ( $\Delta E/E$ ) разрешением, методом измерения поляризации. Условия работы телескопа (высотный аэростат, космический корабль) определяют фоновые загрузки и способность телескопа выделять потоки КГИ.

а) Угловое разрешение  $\gamma$  – телескопов.

Всенаправленные телескопы для интервала мягких  $\gamma$  – квантов (0,1–10 Мэв). Активные и пассивные коллиматоры, щелевые, сотовые и т.д. используются для придания приборам свойств направленных детекторов.

Счетчиковые  $\gamma$  –телескопы для регистрации энергичных  $\gamma$  –квантов позволяют получить угловое разрешение

$\Delta \theta \approx 15^\circ$  при  $E = 100$  Мэв (ОСО-3, "Космос-208").

Использование искровых камер и фотоэмульсии в телескопах позволяет улучшить угловое разрешение и уменьшить фоновый счет, увеличить геометрический фактор и эффективную площадь. Используются различные типы оптических и автоматических искровых камер. Искровые  $\gamma$ -телескопы ( $\Delta \theta \approx 5^\circ$  при 100 Мэв): "Космос-264" (рис. 2), SAS-2 (рис. 3), COS-B.

Фотоэмульсия в качестве конвертора ( $\Delta \theta \approx 1^\circ$ ).

Черенковские регистраторы ШАЛ в интервале сверхжестких  $\gamma$ -квантов ( $10^2 - 10^4$  Гэв). Наземная установка с оптическими зеркалами большой площади (до  $100 \text{ м}^2$ ), регистрирующая черенковское излучение ШАЛ, созданного  $\gamma$ -квантом в верхних слоях атмосферы, имеет угловое разрешение  $\Delta \theta \approx 1^\circ$ . Недостаток метода — большой фон от космических лучей.

#### б) Методы измерения энергии.

Для определения энергии мягких  $\gamma$ -квантов используются спектрометры полного поглощения на кристаллах NaI (Tl), CsI (Tl),  $\frac{\Delta E}{E} \approx 10\%$ ; германий — литиевые и кремниевые детекторы имеют  $\frac{\Delta E}{E} \approx 1\%$ .

Для энергичных  $\gamma$ -квантов — многократное рассеяние в электродах искровой камеры ( $\frac{\Delta E}{E} \approx 30\%$  при 100 Мэв); искровой калориметр, в котором определяется число искр ( $\frac{\Delta E}{E} \approx 50\%$  при 1 Гэв); сцинтилляционный калориметр, счет-

чик полного поглощения.

в) Методы измерения поляризации.

Проводится измерение асимметрии томсоновского рассеяния — для мягких  $\gamma$ -квантов,, асимметрии пространственного расположения плоскостей конверсионных пар — для энергичных  $\gamma$ -квантов.

г) Фоновые условия. Выделение дискретных источников  $\gamma$ -квантов.

Потоки КГИ на 4–5 порядков меньше потока заряженной компоненты космических лучей, поэтому измерения можно проводить за пределами атмосферы.  $\gamma$ -квантовые события имитируются нейтронами и заряженными частицами. Осложняет регистрацию КГИ наличие фонового  $\gamma$ -излучения, возникающего в атмосфере, а при измерениях на спутниках — непосредственно в самих спутниках. Наведенная активность — искусственная радиоактивность детектора, вызванная космической радиацией, которая особенно велика в радиационных поясах. Наилучшие условия измерения на низкой (200–500 км) экваториальной орбите.

Наличие широтной зависимости  $\gamma$ -излучения при измерении на ИСЗ свидетельствует о “загрязнении” фоновыми  $\gamma$ -квантами. Извлечение истинного потока КГИ в этих условиях проводится экстраполяцией на бесконечную жесткость геомагнитного обрезания.

Поиск дискретных источников КГИ. Минимальный регистрируемый поток от источника  $F_{min} = C \left( \frac{B \Delta \Omega}{S_{эф} t} \right)^{1/2}$ , где  $B$  — фоновый поток,  $\Delta \Omega \approx \pi (\Delta \theta)^2$  — пространственное угловое разрешение телескопа,  $S_{эф}$  — эффективная площадь,  $t$  — время наблюдения источника,  $C \approx 3$  — величина избытка над фоном, выраженная в стандартных отклонениях. Наиболее эффективный фактор, линейно связанный с  $F_{min}$  — угловое разрешение

Критерии дискретного источника. Критерий функции максимума правдоподобия  $\mathcal{L}(S) = \frac{1}{M} \left( \frac{S}{B} + 1 \right)^M e^{-S}$  где  $N$ ,  $B$ ,  $S$  — полный, фоновый и источниковый счета  $\gamma$  — квантов,  $M$  — число "проб" при обработке экспериментальных данных. Источник считается реальным, если превзойден 95 % уровень достоверности ( $A = 0,95$ ), т.е.  $\mathcal{L}_{max} \geq \frac{1}{1-A} = 20$ . Для  $\mathcal{L}_{max} < 20$  — возможный источник верхним пределом, находимым из условия  $\mathcal{L}(S_{верх}) = \mathcal{L}_{max} (1-A)$ . Критерий повторяемости. Возможный источник считается реальным, если он наблюдается в нескольких экспериментах.

За последние 10 лет "поисковые способности"  $\gamma$  — телескопов по  $F_{min}$  возросли в  $10^3$  раз и достигли уровня  $10^{-6} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек}}$  для  $E \geq 100$  Мэв.

д) Средства доставки.

Высотные аэростаты: полезный вес до 1 тснн; высота

дрейфа  $2 \text{ г/см}^2 - 7 \text{ г/см}^2$  остаточной атмосферы для американских и отечественных аэростатов; длительность полета до нескольких суток. Геофизические ракеты: полезный вес до 100 кг, высота до 200 км, продолжительность полета вне атмосферы  $\sim 10$  мин.

ИСЗ, космические корабли, ДОС — главное направление  $\gamma$  — астрономии:

- Большая продолжительность наблюдений (до 1 года) ;
- Выход за пределы атмосферы, минимальный фон ;
- Возможность непрерывной ориентации на источник;
- Проверка "загрязнения" измерением широтной зависимости.

Специализированные  $\gamma$  — спутники : E S R O ТД-1, COS -B, SAS - 2 (низкая, 400-600 км, почти экваториальная орбита, малый фон).

## У. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Поиски КГИ, начатые 15 лет назад, долгое время не давали положительных результатов из-за больших фонов и малой светосилы  $\gamma$  — телескопов. Заметный прогресс за последние годы: открытия  $\gamma$  —излучения Галактики, диффузного потока, ряда дискретных источников, кратковременных всплесков мягких  $\gamma$  — квантов. В ближайшее время наблюдательная  $\gamma$  — астрономия может стать основным источником новой астрофизической информации и решить задачи, пе-

речисленные в разделе III.

### 1. Галактическое $\gamma$ -излучение.

Результаты многих наблюдений, в первую очередь выполненных на спутниках OSO-3 и SAS-2, указали на существование диффузного анизотропного  $\gamma$ -излучения Галактики. Измерены широтное и долготное распределения и энергетический спектр галактического потока  $\gamma$ -квантов.

#### а) Широтное распределение (рис. 4).

Для района центра Галактики ( $l = \pm 30^\circ$ ) и  $\gamma$ -квантов с  $E \geq 100$  Мэв распределение состоит из двух компонент (рис. 4а):  $f_\gamma(b) = K f_{уз} + (1-K) f_{шир}$ , где  $f_{уз}$ ,  $f_{шир}$  — узкая ( $b \approx \Delta b \approx 4^\circ$ ) и широкая ( $b \approx 6-7^\circ$ ) компоненты;  $K = 0,5-0,6$ . Широкая компонента отождествляется с  $\gamma$ -излучением близких к Солнцу участков Галактики ( $r < 3$  кпс), узкая — с  $\gamma$ -излучением, приходящим с расстояний  $r > 3$  кпс. С напреглений, близких к антицентру, приходит только широкая компонента (рис. 4 б).

Увеличенный поток  $\gamma$ -квантов в областях  $l = \pm 30^\circ$ ,  $b = 15-30^\circ$  и  $l = 160-200^\circ$ ,  $b = -10 - -15^\circ$  — возможно, проявление структуры Галактики, наблюдаемой также в радиоизлучении (*Golden Belt*).

#### б) Долготное распределение (рис. 5).

Особенности распределения связаны с дискретной

структурой Галактики: спиральными рукавами (рис.6) и локальными источниками. Максимумы  $\gamma$ -излучения наблюдаются с направлений, где луч зрения проходит вдоль спирального рукава, т.ч. "набирается" максимальное произведение потока космических лучей на количество межзвездного газа (рис.5)

|                       |                         |
|-----------------------|-------------------------|
| $l = 310 - 315^\circ$ | - рукав <i>Scutum</i> , |
| $l = 330 - 335^\circ$ | - рукав <i>Norma</i> ,  |
| $l = 340 - 345^\circ$ | - рукав на 4 кпс,       |
| $l = 70 - 80^\circ$   | - рукав <i>Orion</i> .  |

Резкое уменьшение потока  $\gamma$ -квантов при  $l > 50^\circ$  и плато в интервале  $l = 50^\circ - 70^\circ$ , где нет особенностей спиральной структуры, также подтверждают эту картину.

Однако не наблюдается максимумов с направлений  $l = 50^\circ$  и  $l = 300^\circ$ , от рукава *Sagittarius*.

Остальные особенности в долготном распределении объясняются локальными источниками (см. ниже)

#### в) Энергетический спектр.

Для района центра Галактики  $\gamma$ -поток поровну представлен жестким "пионным" излучением, которое доминирует, начиная с энергией  $E \approx 70$  Мэв, и мягкими  $\gamma$ -квантами со спектром  $E^{-2}$  для  $E < 70$  Мэв.

Величины потоков  $\gamma$ -квантов:

от района центра Галактики ( $|b| \leq 10^\circ$ ,  $l = \pm 30^\circ$ )

$$J (\geq 15 \text{ МэВ}) = 3,5 \cdot 10^{-4} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек. рад.}},$$

$$J (\geq 100 \text{ МэВ}) = (1,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-4} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек. стер.}},$$

от района антицентра Галактики ( $|b| \leq 10^\circ, l = 160-230^\circ$ )

$$J (\geq 100 \text{ МэВ}) = 2 \cdot 10^{-5} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек. рад.}}.$$

## 2. Локальные источники.

Избытки  $\gamma$  - квантов в разных энергетических интервалах наблюдались от многих участках неба, расположенных как в полосе Млечного пути, так и вдали от нее.

### а) Солнце.

Гамма-излучение спокойного Солнца (солнечное  $\gamma$ -альbedo) еще не обнаружено. В августе 1972 г. спутником O5 O-7 зарегистрировано мягкое  $\gamma$ -излучение в линиях 0,5, 2,2, 4,4, и 6,1 МэВ во время сильных солнечных вспышек классов 2В и 3В (табл.1).

Табл. 1.

| Тип вспышки,<br>время изме-<br>рения.                                             | П о т о к $\gamma/\text{см}^2 \text{ сек}$ |         |                           |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------|---------------------------|---------|
|                                                                                   | 0,5 МэВ                                    | 2,2 МэВ | 4,4 МэВ                   | 6,1 МэВ |
| 2В( H $\alpha$ ),<br>2 августа<br>1972 г.<br>0626-0632 UT<br>(до max H $\alpha$ ) | $(7 \pm 1,5) \cdot 10^{-2}$                |         |                           |         |
|                                                                                   | $(2,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-1}$              |         | $(3 \pm 1) \cdot 10^{-2}$ |         |
|                                                                                   | $(3 \pm 1) \cdot 10^{-2}$                  |         |                           |         |
| 1                                                                                 | 2                                          | 3       | 4                         | 5       |

| 1                           | 2                             | 3                 | 4                 | 5 |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|---|
| 3В (H <sup>+</sup> )        | $(3,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-2}$ |                   |                   |   |
| 7 августа                   |                               |                   |                   |   |
| 1972г.,                     | $(2,6 \pm 1) \cdot 10^{-2}$   |                   | $2 \cdot 10^{-2}$ |   |
| 1538-1547 UT                |                               |                   |                   |   |
| (после max H <sub>α</sub> ) |                               | $2 \cdot 10^{-2}$ |                   |   |

Линия 2,2 Мэв указывает на возникновение в солнечной атмосфере нейтронного потока ( $n+p \rightarrow d+\gamma$ ,  $E = 2,23$  Мэв), а линия 0,5 Мэв – на рождение  $\pi^+$  – мезонов, которые через  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$  – распады приводят к появлению потока позитронов с их последующей аннигиляцией ( $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$ ,  $E = 0,51$  Мэв). Интерпретация двух других линий менее определена: излучение возбужденных ядер  $C^{12*}$  ( $E=4,43$  Мэв) и  $O^{16*}$  ( $E = 6,13$  Мэв). По интенсивности определено число ускоренных во вспышке протонов: за  $\sim 10^3$  сек образовалось  $2 \cdot 10^{33}$  протонов с  $E = 10-50$  Мэв.

б) Крабовидная Туманность (КТ) и пульсар  $NP\ 0532$  ( $\ell = 185^\circ$ ,  $b = -6^\circ$ ), остаток сверхновой 1054 г.

Энергетический спектр КТ остается одностепенным  $AE^{-\alpha}$  с показателем  $\alpha \approx 2$  вплоть до  $E = 1$  Гэв, что указывает <sup>на</sup> синхротронную природу излучения (рис.7). Регистрируемые потоки:

$$F (\geq 100 \text{ Мэв}) = (3,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-6} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек.}}, \text{ из них}$$

$$F_{\text{пульс.}} (\geq 100 \text{ Мэв}) = (2,2 \pm 0,7) 10^{-6} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек}}$$

пульсирующее с периодом  $\tau \approx 33$  мсек  $\gamma$  -излучение пульсара (рис.8). Доля пульсирующей компоненты велика,  $70 \pm 30\%$  для  $E \geq 100$  Мэв, тогда как в области рентгена она составляет 2-10%.

в) Туманность Парус - X ( $\ell = 264^\circ$ ,  $b = -3^\circ$ ), остаток сверхновой, вспыхнувшей  $\sim 9000$  лет назад.

$$F (\geq 100 \text{ Мэв}) = (5,0 \pm 1,2) 10^{-6} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек}}$$

$$F (\geq 35 \text{ Мэв}) = (1,1 \pm 0,3) 10^{-5} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек}}$$

Спектр жесткий, "пионный".

Пульсирующий поток от пульсара PSR 0833 ( $\tau = 89$  мсек), расположенного в центре Туманности, по одним данным найден ( $\sim 1,5 10^{-5} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек}}$  для  $E = 10-30$  Мэв), по другим его нет ( $< 2,1 10^{-6} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек}}$  для  $E \geq 35$  Мэв).

г) Протяженный источник ( $\ell = 185-200^\circ$ ,  $b = 5 \pm 3^\circ$ ).

Регистрируемый источник связан, возможно, со старой сверхновой IC 443 ( $\ell = 189^\circ$ ,  $b = 3^\circ$ ), возраст которой 60000 л, и расстояние до Солнца 1,5 клс.

д) Источник (или источники?) в районе созвездия Лебедя ( $\ell = 70-80^\circ$ ,  $b = 0$ ).

От этой области неба несколько раз регистрировались

избыточные потоки  $\gamma$ -квантов. Иногда потоки не наблюдались, что, скорее всего, указывает на их переменность.

В этом месте расположен рентгеновский источник *Cyg X-3* с периодическим рентгеновским и инфракрасным излучением,

$\tau = 4,8$  час. В сентябре 1972 г. от *Cyg X-3* наблюдались сильные всплески радиоизлучения. Вслед за этим про-

ведены наблюдения  $\gamma$ -излучения от этой области в интервалах энергичного ( $E \geq 40$  Мэв) и сверхжесткого ( $E \geq 10^{12}$  эв)  $\gamma$ -излучений (рис.9). Если зарегистрированное

$\gamma$ -излучение связано с *Cyg X-3*, расстояние до которого  $\sim 10$  кпс, то  $W_\gamma (\geq 40 \text{ Мэв}) = 5 \cdot 10^{37} \frac{\text{эрг}}{\text{сек}}$ ,  
 $W_\gamma (\geq 10^{12} \text{ эв}) \simeq 2 \cdot 10^{36} \frac{\text{эрг}}{\text{сек}}$ .

д) Район центра Галактики ( $l = 350-10^\circ$ ,  $|b| \leq 10^\circ$ ).

Максимум в долготном распределении от этой области (рис.5), возможно, указывает на  $\gamma$ -излучение галактического ядра.

Рис. 10 -  $\gamma$ -карта района центра Галактики, полученная телескопом с угловым разрешением  $\Delta \theta = 1,5^\circ$  при  $E = 15$  Мэв. Концентрация событий в полосе  $l = 350-360^\circ$ ,  $b = 0 \div 2^\circ$  (галактическое ядро?) и в двух кружках с радиусом  $1,5^\circ$ :  $l = 15^\circ$ ,  $b = -7^\circ$ ;  $l = 353^\circ$ ,  $b = -1^\circ$ .

ж) Возможные внегалактические источники.

Избытки  $\gamma$ -квантов наблюдались от областей неба,

где расположены активные галактики : 3C120, PK S 1514-24, NGC 4151. Наблюдения на SAS-2 дали лишь верхние пределы на уровне  $10^{-6} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек}}$  для  $E \geq 100 \text{ Мэв}$ .

По наблюдениям, проведенным на ИСЗ и аэростатах, составлен каталог возможных дискретных источников  $\gamma$ -квантов. Рис. 11 – карта дискретных источников из каталога, отобранных с учетом критерия повторяемости. Наблюдается концентрации источников к плоскости Галактики и корреляция с областями, богатыми газом и молодыми звездами (ОВ – ассоциации).

### 3. Диффузное изотропное $\gamma$ -излучение

Изотропная компонента диффузного КГИ отождествляется с изучением всей Метагалактики, т.ч. ее исследование имеет большую ценность для астрофизики и космологии.

#### а) Изотропия излучения.

В интервале рентгена (10-100 кэв) изотропия излучения составляет 1-5% на угле  $10^\circ$ . В Области мягкого и энергичного  $\gamma$ -излучений изотропия  $\sim 10\%$  (по данным "Космос-461", OSO-3, SAS-2).

#### б) Энергетический спектр (рис. 12).

Общий одностепенный закон от области рентгена (30 кэв) до  $\gamma$ -квантов с энергией  $E = 200 \text{ Мэв}$ :

$$\frac{d\gamma}{dE} = 0,011 E^{-2,3} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек. стер. Мэв}}.$$

Возможное превышение над степенным спектром в интервале 1-30 Мэв — указание на космологический поток  $\gamma$ -квантов.

#### 4. Кратковременные всплески мягких $\gamma$ -квантов.

Спутниками Вела (5А, 5В, 6А, 6В), ОСО-7, ТМР-6, -7, "Космос-461", ТД-1, САС-2 обнаружено новое астрофизическое явление — кратковременные всплески  $\gamma$ -квантов (рис. 13).

Характеристики всплесков:

- длительность 1-50 сек;
- временная структура: отдельные пики длительностью 1 сек, повторяющиеся через определенное время;
- микроструктура со шкалой  $\Delta t \approx 0,1$  сек;
- поток энергии до  $2 \cdot 10^{-4}$  эрг/см<sup>2</sup> за время всплеска;
- непрерывный спектр с наибольшим потоком в интервале 0,1 — 0,4 Мэв;
- приблизительная изотропия источников на небе;
- частота  $\sim 5 \text{ год}^{-1}$  для  $S' \geq 10^{-5}$  эрг/см<sup>2</sup>.

Распределение  $\mathcal{N}(S') \sim S'^{-0,5}$ , возможно, указывает на расположение источников в местном рукаве Галактики. По галактической (местной) гипотезе расстояние до источников  $R \lesssim 100$  пс и мощность излучения  $W \approx 10^{37}$  эрг/сек. Метагалактическая гипотеза ( $R \gtrsim 100$  Мпс,

вспышки в ядрах галактик и квазаров,  $W \approx 10^{46} \frac{\text{эрг}}{\text{сек}}$  ).

## У1. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Полученные результаты позволяют сделать ряд астрофизических выводов.

### 1. Распределение космических лучей и вещества в Галактике

Результаты наблюдений качественно подтверждают модель Бигнами-Фихтела, согласно которой газ, магнитное поле и космические лучи сосредоточены в основном в спиральных рукавах, где соответствующие плотности в  $\sim 5$  раз выше, чем в пространстве между рукавами. Основной вклад в наблюдаемое  $\gamma$ -излучение вносит ближний рукав (*Sagittarius*), расположенный в 2 кпс от Солнца — отсюда широкая компонента в широтном распределении (рис. 4а).

Однако существуют и другие трактовки результатов наблюдений. Из данных SAS-2 вычислена  $\gamma$ -светимость Галактики, которая обнаруживает максимум на  $R_c = 4-6$  кпс ( $R_c$  — расстояние от центра Галактики). Объяснение: либо в этой области повышенная интенсивность космических лучей, ускоряемых за счет механизма Ферми (Стеккер и др.), либо повышенная концентрация молеку-

лярного водорода, достигающая  $10 \text{ см}^{-3}$  и превышающая на порядок среднюю концентрацию атомарного водорода (Стронг и др., Соломон и Стеккер). В последнем случае космические лучи равномерно распределены по всему диску Галактики.

Шкловский, основываясь на модели Бигнами-Фихтеля, показал, что потери протонов на  $\gamma$ -излучение и электронов на радиоизлучение составляют:  $\frac{dW_p}{dt} = 2 \cdot 10^{39} \frac{\text{эрг}}{\text{сек}}$ ,  $\frac{dW_e}{dt} = 6 \cdot 10^{37} \frac{\text{эрг}}{\text{сек}}$ . Их отношение ( $\sim 30$ ) близко к отношению плотностей соответствующих компонент ( $\sim 30$ ), — указание на то, что космические лучи проникают в спиральные рукава и там с большой вероятностью "гибнут", растрачивая свою энергию на  $\gamma$ -излучение (протоны и ядра) и радиоизлучение (электроны).

## 2. Происхождение космических лучей

Т.к. достигнутый уровень чувствительности  $\gamma$ -астрономических наблюдений составляет сейчас только  $10^{-6} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$ , идея Гинзбурга о выборе между галактической и метагалактической гипотезами по наблюдению Магелановых Облаков еще не реализована. Но из результатов наблюдений можно получить ряд аргументов в пользу галактического происхождения космических лучей (с энергией несколько Гэв):

а) Поток  $\gamma$ -квантов со стороны анцицентра не совпадает с ожидаемым по метагалактической модели и нахо-

дится в разумном согласии с возможными галактическими источниками — остатками сверхновых, областями H II (Стронг и др.).

б) Гамма-излучение туманности Парус — X, имеющее жесткий "пионный" спектр — первое свидетельство генерации протонов и ядер в оболочках сверхновых. (Парус-X — близкий к Солнцу остаток сверхновой,  $R = 460$  пс, возраст 9000 лет).

Из измеренного потока  $\gamma$ -квантов следует, что в космические лучи перешло  $3 \cdot 10^{50}$  эрг, тогда как для наполнения Галактики космическими лучами достаточно  $10^{49}$ – $10^{51}$  эрг на каждую сверхновую.

в) Гамма-излучение Крабовидной Туманности и пульсара в ней (синхротронный спектр) указывает на то, что в момент взрыва сверхновой и молодым пульсаром генерируется в основном электронная компонента.

### 3. Метагалактические космические лучи

Общий степенной спектр изотропного диффузного рентгеновского и  $\gamma$ -излучения с показателем  $\alpha \approx 2,3$  объясняется комптоновским рассеянием метагалактических электронов на реликтовых фотонах. Отсюда при критической плотности межгалактического газа ( $10^{-5} \text{ см}^{-3}$ ) плотность электронов в Метагалактике на 2–4 порядка меньше, чем в Галактике.

Избыток над степенным спектром в интервале 1-30 Мэв можно трактовать, как проявление космологического  $\gamma$ -излучения с  $z \approx 100$  (Стеккер), однако, результаты наблюдений противоречивы.

#### 4. Оценки плотности антивещества

По экспериментальным результатам для изотропного диффузного  $\gamma$ -излучения получены оценки плотности межгалактического газа и антигаза, исходя из соотношения

$F_\gamma \approx \frac{1}{4\pi} R_H n \tilde{n} (\overline{\sigma_a v})$ , где  $R_H \approx 10^{28}$  см хаббловский радиус Метагалактики;  $n, \tilde{n}$  - плотности газа и антигаза,  $(\overline{\sigma_a v})$  - усредненное по спектру произведение сечения аннигиляции на относительную скорость частиц.

Если газ ионизирован,  $(\overline{\sigma_a v}) = 10^{-15} \frac{\text{см}^3}{\text{сек}}$  и  $n \cdot \tilde{n} \lesssim 10^{-17} \text{ см}^{-6}$ , т.е. либо  $n = \tilde{n} \lesssim 3 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-3}$  (симметричная,  $B = AB$ , открытая Вселенная), либо  $n = 10^{-5} \text{ см}^{-3}$ ,  $\tilde{n} \lesssim 10^{-12} \text{ см}^{-3}$  (несимметричная по барионному заряду, закрытая Вселенная).

Если газ нейтрален,  $(\overline{\sigma_a v}) = 10^{-10} \frac{\text{см}^3}{\text{сек}}$  и  $n \cdot \tilde{n} \lesssim 10^{-22} \text{ см}^{-6}$  и в случае  $B = AB$   $n = \tilde{n} \lesssim 10^{-11} \text{ см}^{-3}$ , что совпадает с другими оценками плотности нейтрального межзвездного газа.

#### 5. Дискретные источники

Величины потоков (или верхних пределов потоков)  $\gamma$ -квантов от ряда дискретных источников позволяют произвести выбор между моделями этих источников и получить оцен-

ки некоторых параметров. Так, например, установлено, что электроны в Крабовидной Туманности и радиогалактике M87 образуются непосредственно, а не через  $\pi$ - $\mu$ - $e$ -распад.

Получены оценки магнитного поля :

$$\bar{H}_{KT} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ гс}, \quad H_{\text{MPO 532}} > 10^3 \text{ гс}, \quad \bar{H}_{\text{M87}} > 10^{-5} \text{ гс}.$$

## УП. ПЕРСПЕКТИВЫ ГАММА-АСТРОНОМИИ

Достигнутый уровень  $F_{\min} \approx 10^{-6} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек}}$  в измерении потоков от дискретных источников для  $\gamma$ -квантов с энергией  $E \geq 100 \text{ Мэв}$  получен на телескопах с эффективной площадью до  $S_{\text{эф}} = 10^3 \text{ см}^2$ , угловым разрешением до  $\Delta \theta = 3-4^\circ$  и длительностью наблюдения дискретного источника до  $t_{\text{наб}} \approx 1$  неделя ("Космос-264", SAS-2, ТД-1). Такого же типа европейский  $\gamma$ -телескоп, установленный на спутнике COS-B (запуск в 1975 г.).

Следующее поколение  $\gamma$ -телескопов (1977-1980 г.г.) :

$S_{\text{эф}} \approx 2000 \text{ см}^2$ ,  $\Delta \theta = 1-2^\circ$ ,  $t_{\text{наб}} \approx 2$  мес, позволит достичь уровня  $F_{\min} \approx 10^{-7} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек}}$ . Приблизительно таких параметров создаются телескопы в США (будут установлены на спутнике - астрофизической обсерватории высоких энергий (HEAO) или на орбитальных станциях программы *Shuttle*) и в СССР.

Методические усовершенствования :

а) Телескоп, регистрирующий двойное комптоновское рассеяние мягких  $\gamma$ -квантов.

Телескоп группы Альвареца (США) с жидкостными ксеноновыми счетчиками : пространственное разрешение 2 мм, энергетическое разрешение  $\Delta E/E \approx 10\%$  при 1 Мэв, точность локализации потока  $\gamma$ -квантов от дискретного источника  $\sim 0,1$  квад.град.

б) Телескоп с газовым черенковским счетчиком.

$S_{эф} = 3-5 \text{ м}^2$ ,  $\Delta \Theta \approx 1^\circ$ , пороговый Лоренц-фактор  $\gamma_{пор} \approx 10^{-2}$ , малый фон от космических частиц.

в) Счетчики полного поглощения.

Проект телескопа Хофштадтера-Хьюза с нитяными пропорциональными счетчиками и кристаллом  $\text{NaI}(\text{Tl})$  (диаметр  $\approx$  высоте  $\approx 40$  см,  $\Delta E/E \approx 1\%$  при 1 Гэв).

Третье поколение телескопов, созданных на основе этих разработок и проектов, которые будут устанавливаться на спутники в 80-х годах, позволит достигнуть уровня

$F_{min} = 10^{-8} - 10^{-9} \frac{\gamma}{\text{см}^2 \text{ сек}}$ , углового и энергетического разрешений  $\Delta \Theta = 1^\circ$  и  $\frac{\Delta E}{E} \approx 5\%$  соответствен-

но и измерять поляризацию с точностью 5-10%. Такие телескопы способны будут решать большую часть задач, стоящих перед  $\gamma$ -астрономией в настоящее время, но ясно, что к моменту их ввода круг  $\gamma$ -астрофизических исследований претерпит существенные изменения.

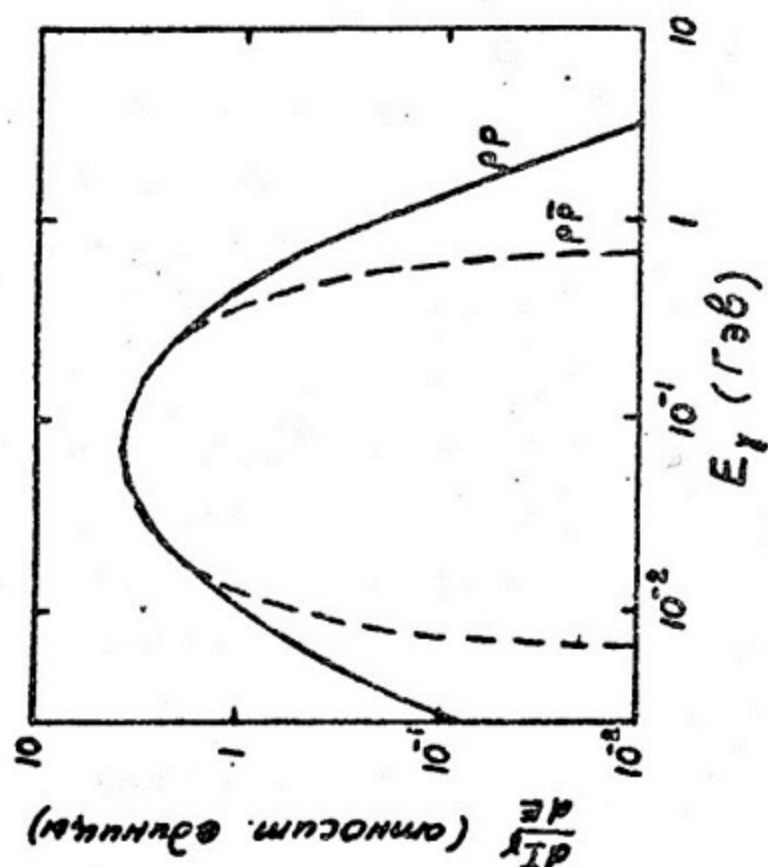


Рис. 1. Дифференциальные спектры "пионных" космических  $\gamma$  - квантов, генерируемых в  $pp$  и  $p\bar{p}$  взаимодействиях.

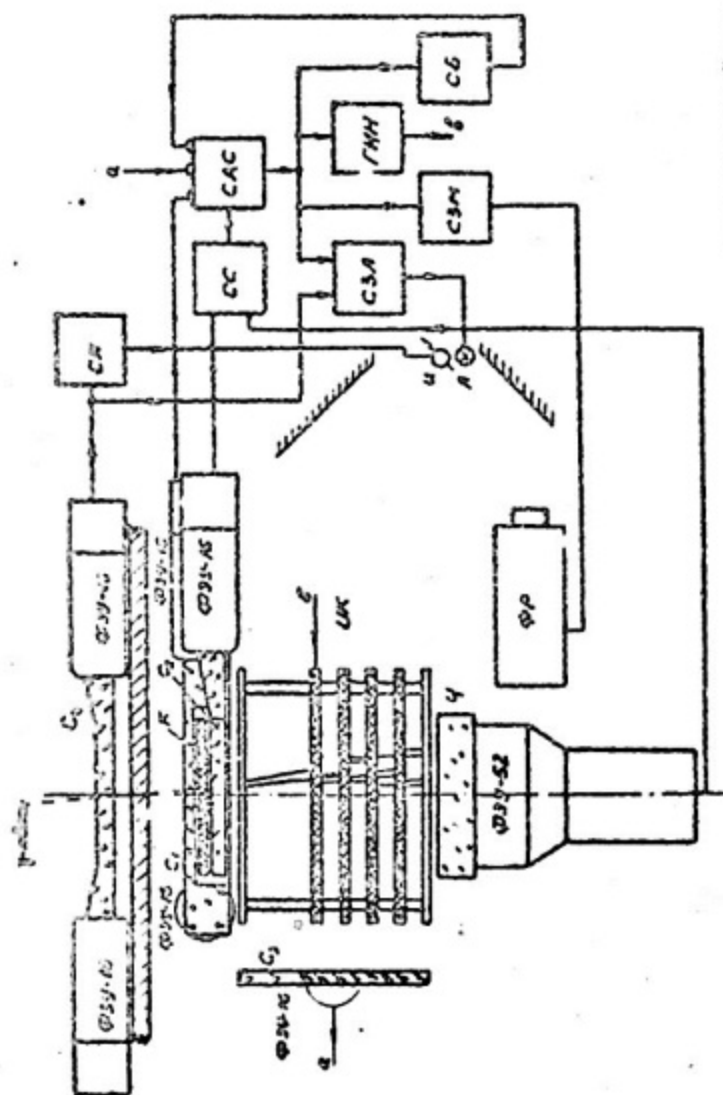


Рис. 2. Блок-схема  $\gamma$  - телескопа с широкозонной искровой камерой ("Космос-264"):  $C_1-C_4$  - сцинтиляционные счетчики, Ч - направленный черенковский счетчик, К-конвертор, СС, САС, СБ, СЗМ и др. - электронные схемы совпадений, антисовпадений, запуска мотора фоторегистратора (ФР) и др., ГИН - генератор импульсного напряжения искровой камеры (ИК); и, - интенсивности сигнальная лампа.

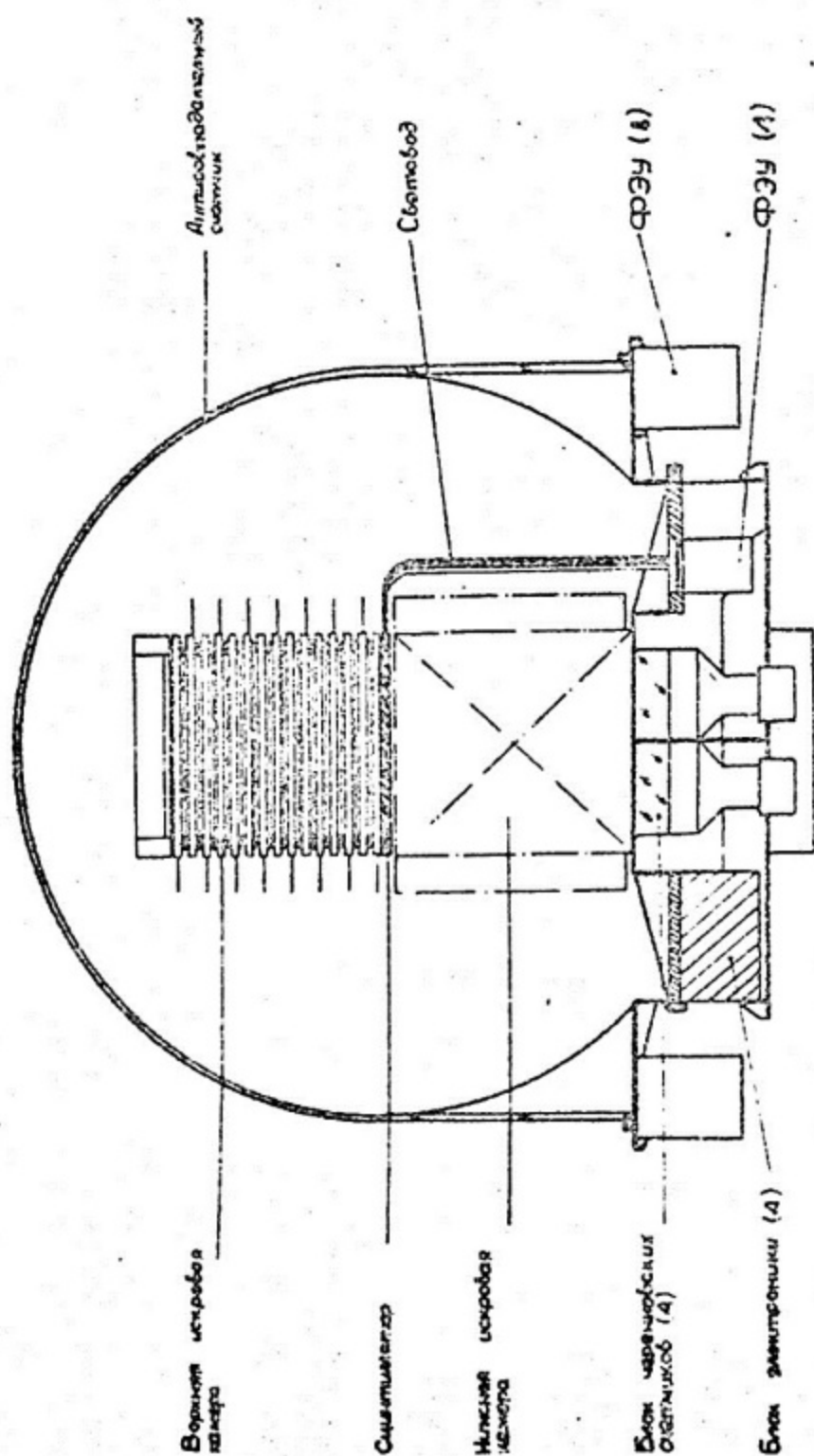


Рис.3. Схема  $\gamma$  - телескопа с нитяной искровой камерой (SAS - 2).

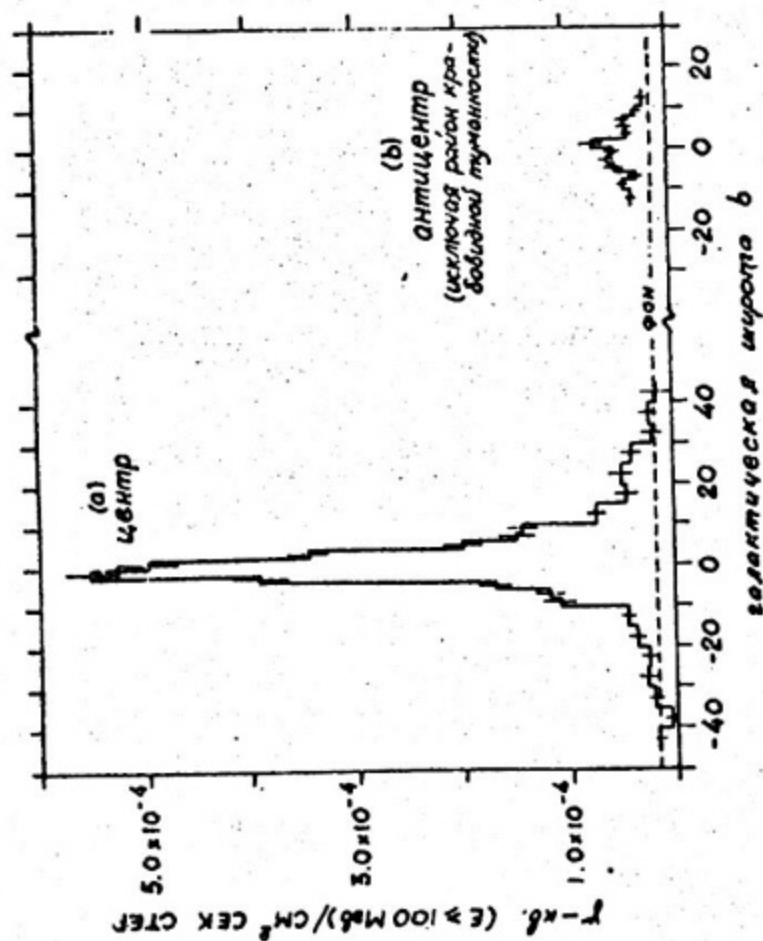


Рис. 1. Широтное распределение  $\gamma$  - излучения Галактики по данным SAS-2 :  
 а) в направлении на центр Галактики ;  
 б) в направлении на антицентр Галактики.

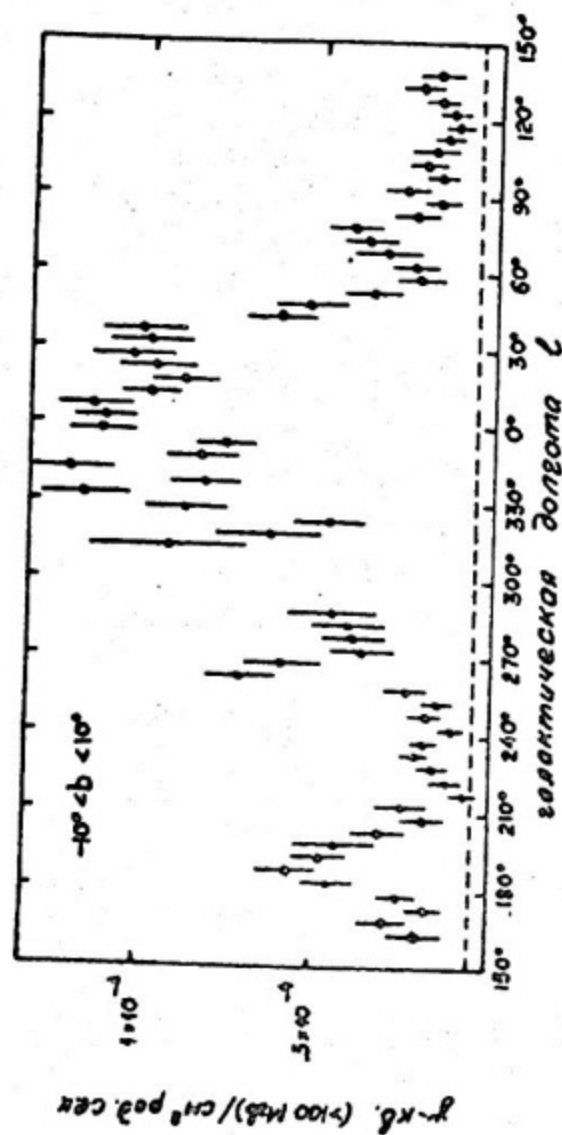
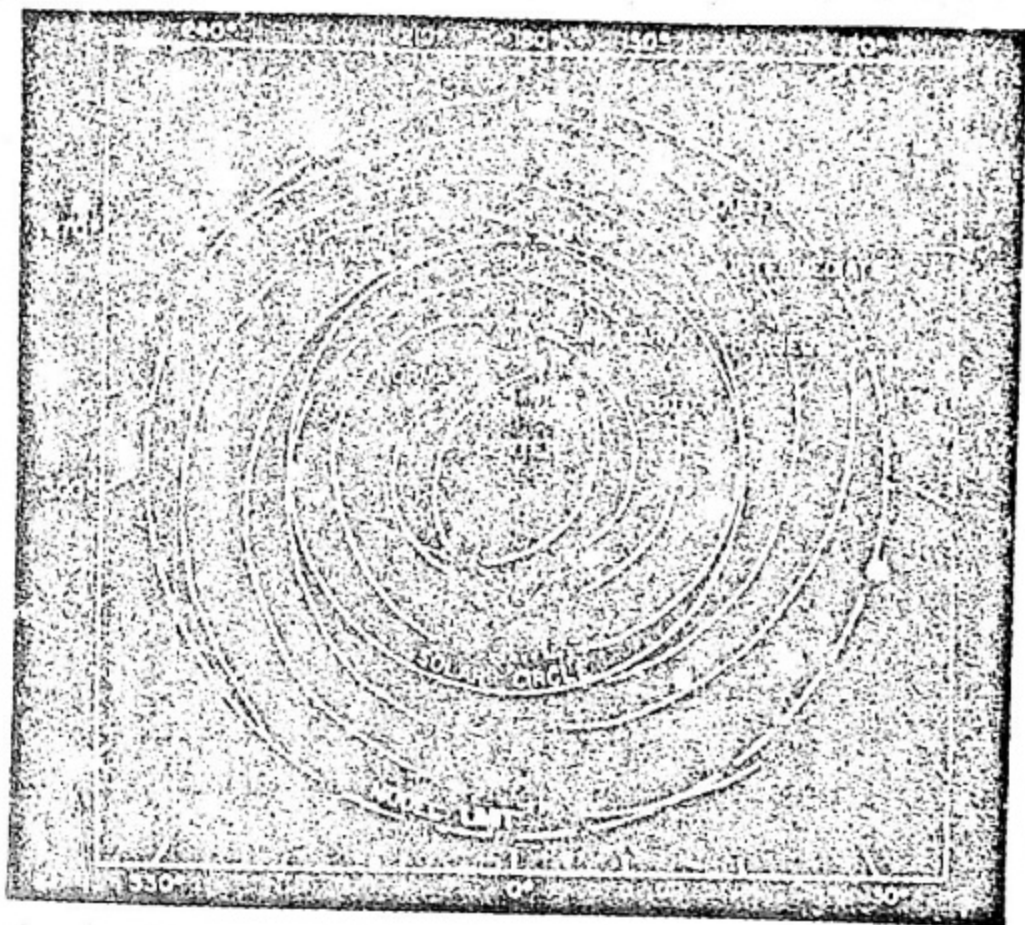


Рис.5. Долготное распределение  $\gamma$  - излучения  
Галактики по данным SAS-2.



. Рис.6. Спиральная структура Галактики (данные радионаблюдений).

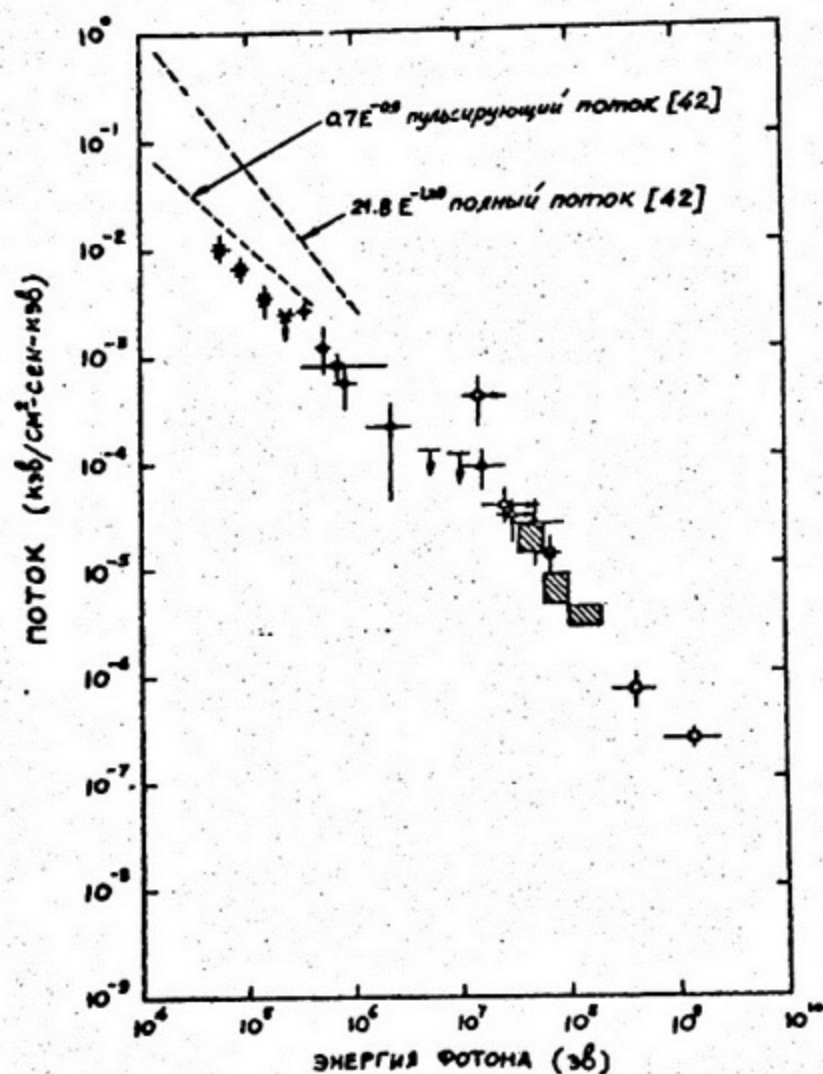
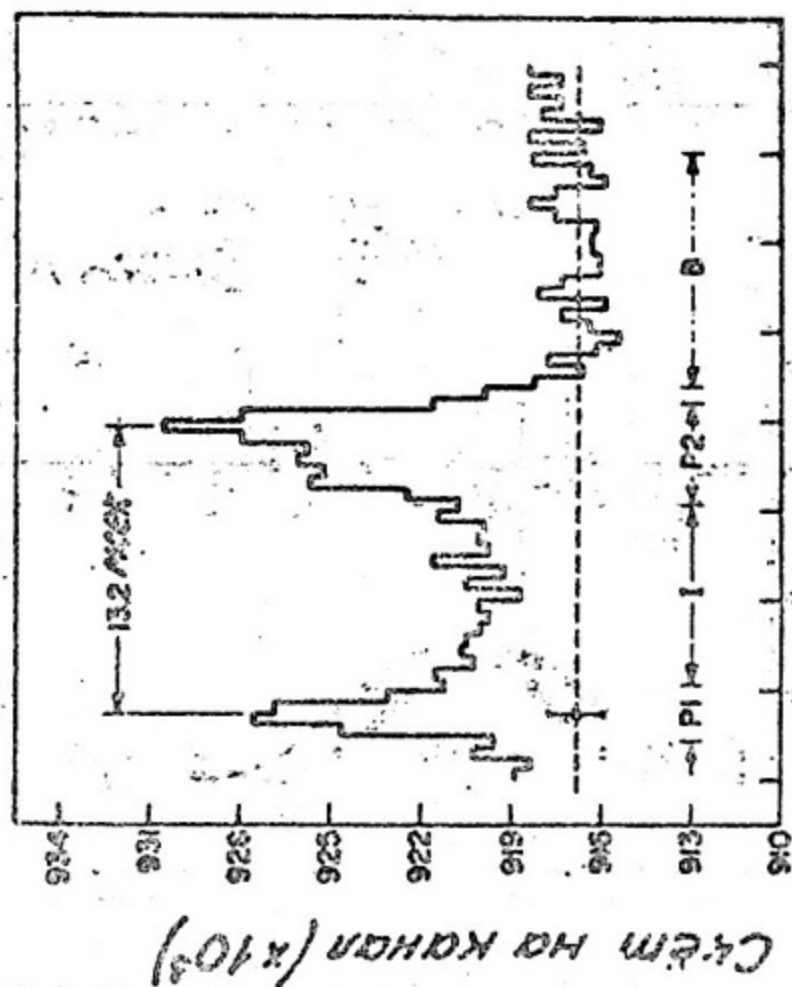


Рис. 7. Энергетические спектры  $\gamma$  - излучения Крабовидной Туманности (полный поток) и пульсара МР 0532 (пульсирующий поток). Показаны результаты наблюдений и аппроксимирующие зависимости.

Рис. 8. Структура импульса пульсара МР 0532 в интервале энергий  $\gamma$ -квантов 0,1-0,4 Мэв.



каналы (1 канал = 0,517 MeV)

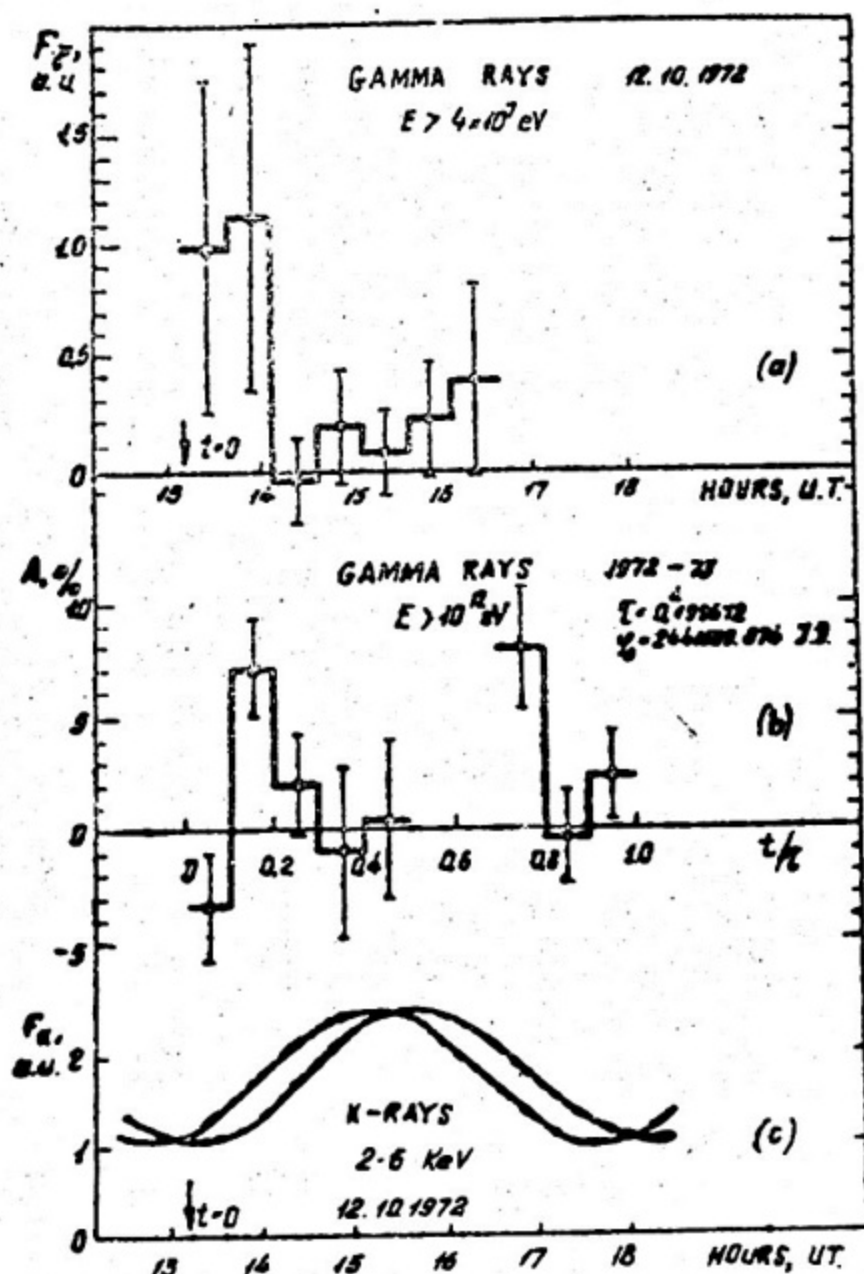


Рис. 9. Рентгеновское и  $\gamma$ -излучение источника  $\text{Cyg X-3}$ : а)  $\gamma$ -кванты с энергией  $\geq 40$  Мэв (аэростатные наблюдения 12.10.1972). б)  $\gamma$ -кванты с энергией  $\geq 10^{12}$  эв (наземные наблюдения в течение 1972-73 г.г.); в) поток рентгеновских квантов с энергией 2-10 кэв (наблюдения на спутниках *Uhuru*, Коперник, OSO-7).

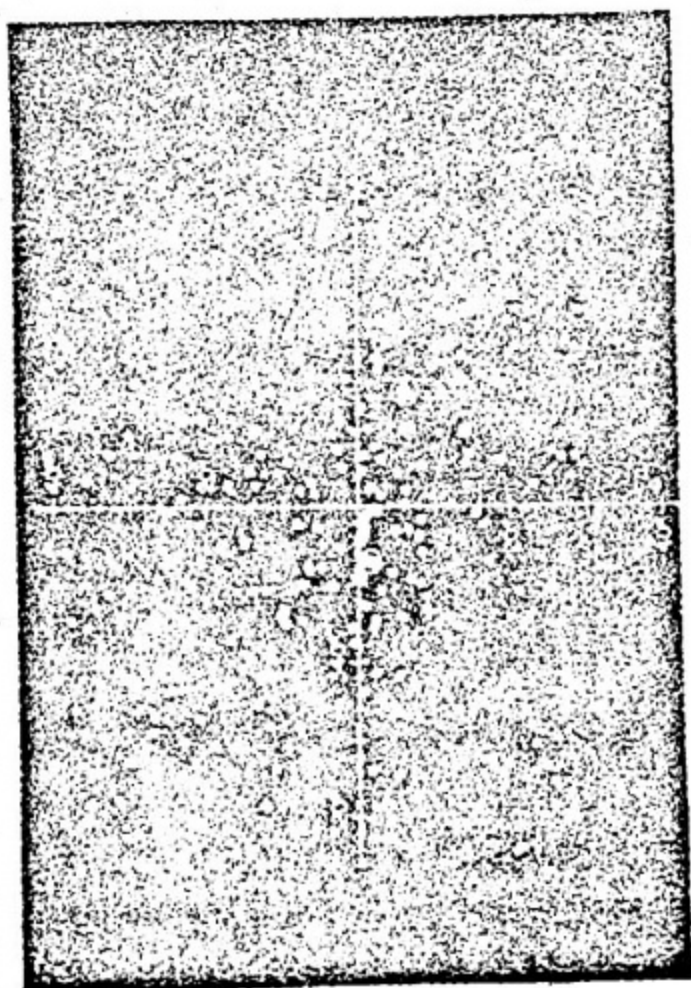


Рис.10. Карта района центра Галактики для  $\gamma$  - квантов с энергией  $\geq 15$  Мэв (наблюдения на аэростате):  $\ell$ ,  $b$  - галактическая долгота и широта.

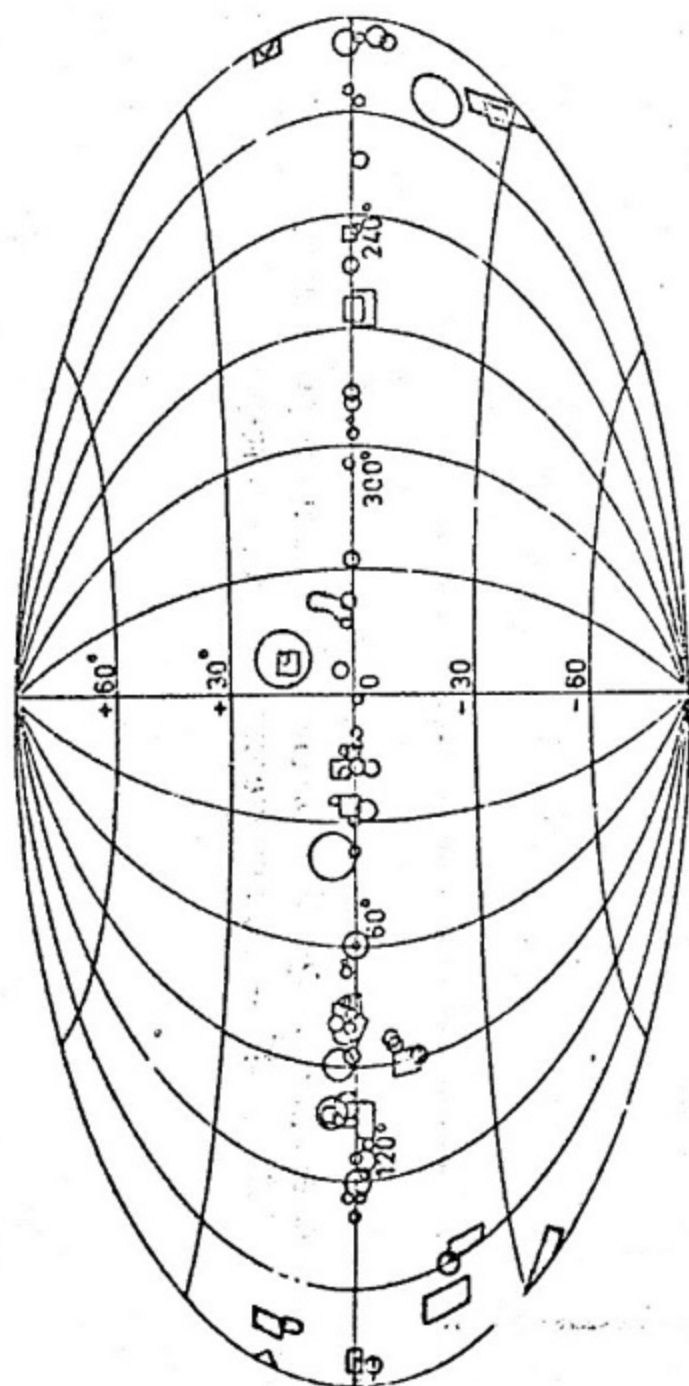


Рис. 11. Карта возможных дискретных источников  $\gamma$ -квантов с энергией  $\gg 50$  Мэв (заштрихованные фигуры) и областей звездных OB-ассоциаций;  $\theta$ ,  $\ell$  - галактические координаты

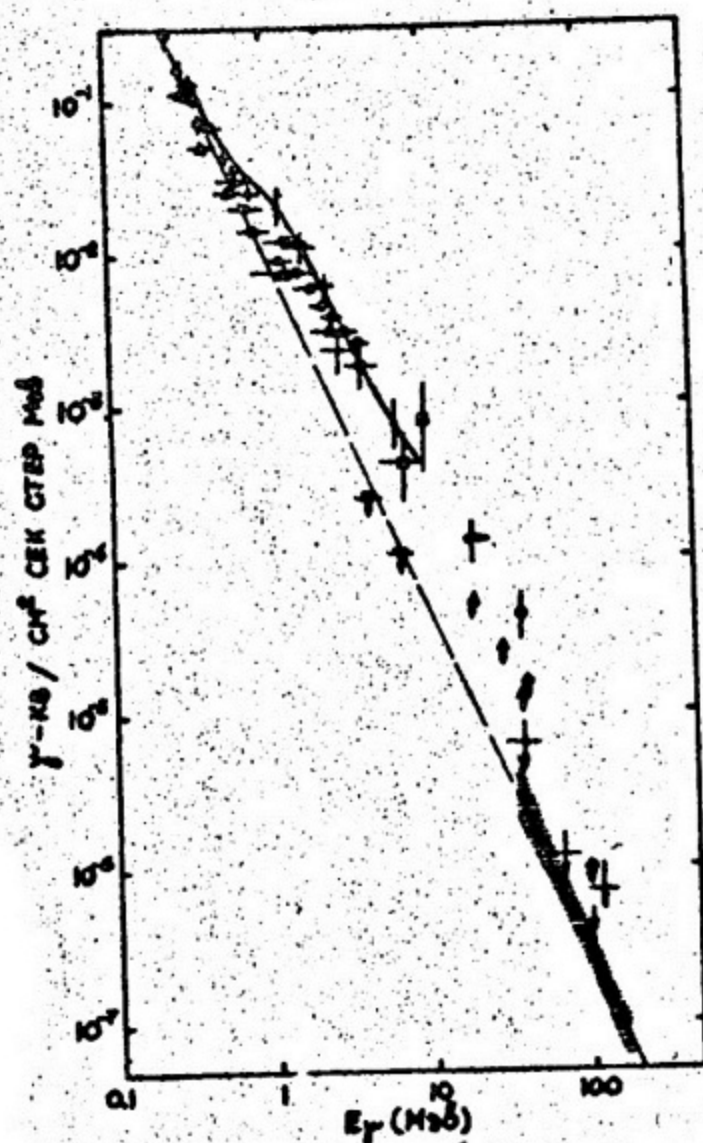


Рис. 12. Дифференциальный энергетический спектр диффузного изотропного  $\gamma$ -излучения.

Показаны результаты спутниковых и аэростатных наблюдений, в том числе "Аполлон-15" (сплошная линия) и SAS-2 (заштрихованная область); штриховая линия - общий одностепенный спектр.

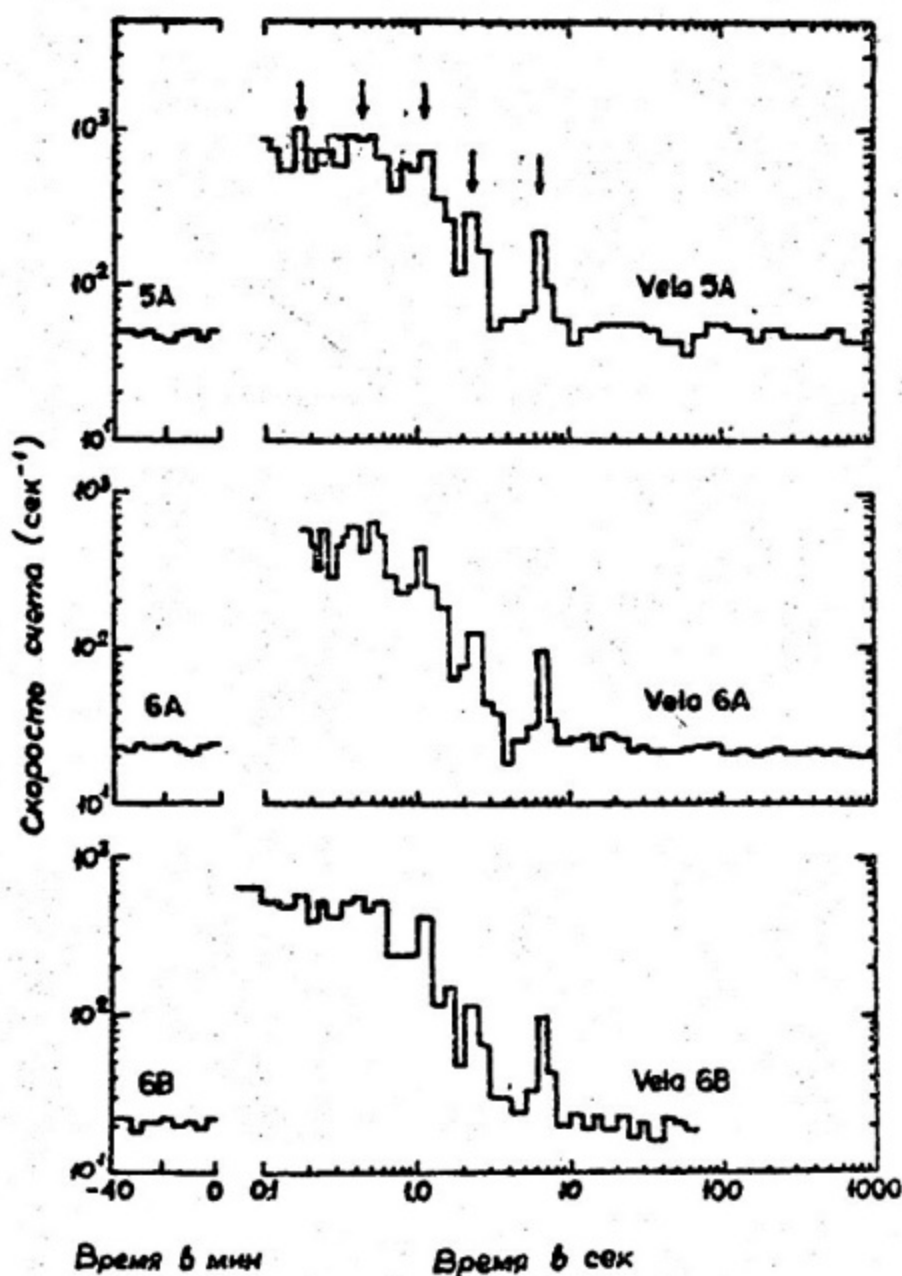


Рис. 13. Пример кратковременного всплеска мягкого  $\gamma$ -излучения (0,2–1,5 Мэв), зарегистрированный спутниками Вела. Стрелками показаны отдельные пики "тонкой" структуры.



Л 91161. Подп. к печати 13/У-75 г. Объем 2,75 п.л.

Заказ 764. Цена 30 к. Тираж 250.

---

Типография МИФИ, Каширское шоссе, дом. 1.