

524.4-77

**МОЩНЫЙ ГАЛАКТИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК
ЖЕСТКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛЕБЕДЬ Х-3**

***Б. М. Владимириский, А. М. Гальпер, Б. И. Лучков,
А. А. Степанян***

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	255
2. Краткая история исследований	256
3. Результаты наблюдений	257
а) Радиодиапазон	258
б) Инфракрасный диапазон	262
в) Рентгеновское излучение	263
г) γ -излучение высоких энергий ($10^7 - 10^{10}$ эВ)	267
д) γ -излучение сверхвысоких энергий ($10^{12} - 10^{14}$ эВ)	269
е) γ -излучение ультравысоких энергий ($> 10^{15}$ эВ)	273
4. Модели источника	275
5. Заключение	280
Список литературы	281

1. ВВЕДЕНИЕ

■

В области астрофизики высоких энергий в последнее время получено много новых результатов. Рентгеновские пульсары и всплески, γ -излучение межзвездного газа под действием космических лучей и рентгеновское излучение газа в скоплениях галактик, рентгеновские активные галактики и дискретные источники γ -квантов в нашей звездной системе — вот далеко не полный перечень открытый рентгеновской и γ -астрономии. Без этих результатов и многих других, полученных со специализированных спутников и высотных аэростатов, просто невозможно представить современную астрофизику.

Главной особенностью исследований по астрофизике высоких энергий является обращение к процессам, сопровождаемым большими выделениями энергий. При этом, как правило, рентгеновское излучение указывает на тепловую сторону явлений с характерными температурами $T = 10^7 - 10^{10}$ К, соответствующими средним энергиям излучаемых фотонов $E = kT = 10^8 - 10^6$ эВ, а γ -излучение сопутствует нетепловой (ускорительной) стадии, во время которой энергии частиц и квантов излучения достигают $10^7 - 10^{16}$ эВ, что характерно уже для энергий космических лучей.

Настоящий обзор посвящен только одному объекту — дискретному галактическому источнику Лебедь Х-3, удаленному от Солнца на расстояние около 10 кпс. Ограничивааясь одним объектом из десятков и сотен, открытых к настоящему времени гамма- и рентгеновскими телескопами, мы умышленно сужаем картину исследований по астрофизике высоких энергий. Но эта общая картина представлена в других местах (см. обзоры ¹⁻⁴). Здесь же мы хотели бы показать предмет исследований крупным планом, сфокусировав внимание на особенностях поведения астрофизического объекта, излучающего в жестких диапазонах электромагнитного спектра. На примере одного

источника можно рассмотреть весь диапазон спектра, где проводились исследования от радиоизлучения до ультравысоких γ -лучей, и провести комплексное всеволновое исследование объекта. Но главное, пожалуй, состоит в том, что Лебедь X-3 представляет собой уникальную звездную систему, которая находится в активной фазе своего развития, сопровождаемой резко нестационарными (вспышечными) процессами, физика которых пока неизвестна. Вспышки Лебедя X-3 происходят довольно часто (от единиц до десятков в год в зависимости от мощности), так что этот источник является той природной лабораторией, где их можно подробно исследовать.

Наблюдения Лебедя X-3 продолжаются немногим более 10 лет, но уже получено достаточно много важных результатов. Богатством своих свойств Лебедь X-3 отчасти превзошел даже знаменитую Крабовидную Туманность — другой нестационарный объект в Галактике, возникший, как известно, в результате вспышки сверхновой. Лебедь X-3 обладает более мощной энергетикой, чем современная Крабовидная Туманность с пульсаром в центре, более широким спектром излучений и большим разнообразием временных характеристик. Поэтому неудивительно, что результаты наблюдений объекта дают обильную пищу для теоретической астрофизики по широкому кругу вопросов. Большое число моделей источника, появившихся в литературе в последнее время, определенно указывает на то, что Лебедь X-3 привлек к себе пристальное внимание научной общественности.

2. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рентгеновский источник Лебедь X-3 был открыт в 1966 г.⁵, в эпоху великих открытий рентгеновской астрономии и получил свое наименование как третий рентгеновский источник в созвездии Лебедя. Наблюдения со специализированного спутника UHURU, проведенные в начале 70-х годов^{6,7}, подтвердили его статус дискретного галактического источника. По четвертому каталогу UHURU⁸ он значится как 4U2030 + 40. Однако широкое внимание к себе Лебедь X-3 привлек сначала не как рентгеновский источник, а как источник вспышечного радиоизлучения.

2 сентября 1972 г. канадские радиоастрономы зарегистрировали мощную вспышку в направлении на Лебедь X-3^{9,10}, вслед за которой, с интервалом в две недели, последовала вторая радиовспышка, еще более мощная¹¹. Известие о первом же событии было разослано во все астрономические центры и, как принято в подобных случаях, указанный источник стал предметом исследований всеми доступными средствами наблюдений, включая и орбитальные телескопы.

Наблюдатели хотели, в первую очередь, получить ответы на два вопроса: что представляет собой оптический партнер источника и как ведет себя объект во время радиовспышек в жестком излучении. Оптического отождествления на первых порах не последовало^{12,13}. Оказалось, что источник расположен далеко, да к тому же практически в экваториальной плоскости Галактики, и потому закрыт от земного наблюдателя толстым слоем поглощающей пыли. По этой причине все оптические вспышки источника, которые могли быть в прошлом, остались бы незамеченными. Его можно наблюдать только в более проникающих видах излучения, таких, например, как радио и рентген, в связи с чем Лебедь X-3 стал доступным для исследований лишь в наше время. Все же наземные телескопы увидели его в ближнем инфракрасном диапазоне (на длинах волн $8 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4 \text{ \AA}$) как объект приблизительно 17 звездной величины^{12,14}, спектральный класс которого установить не удалось из-за сильного покраснения спектра в слое пыли. Инфракрасный источник оказался крайне нестационарным с широким набором вариаций блеска: от коротких минутных всплесков до вспышек длительностью несколько суток, коррелирующих с изменениями потока радиоизлучения. Кроме спорадических вариаций ИК — источник обнаружил небольшие

(на уровне 10%) регулярные изменения потока с периодом $P_0 = 4,8$ ч¹². Первые наблюдения рентгеновского излучения, проведенные во время сентябрьских радиовспышек орбитальными станциями «Copernicus»^{13,14}, UHURU¹⁵ и OSO-7¹⁶, показали, что в жесткой области источник ведет себя совсем по-другому. Не было обнаружено мощных вспышек, подобных тем, которые наблюдались в радиоизлучении. Во время первой радиовспышки интенсивность рентгеновского излучения изменилась не более, чем в 1,5 раза. Зато был отчетливо виден в рентгеновском диапазоне периодический компонент, доля которого по отношению к постоянному уровню составила ~100%¹⁴⁻¹⁷. Рентгеновское излучение имело тот же период P_0 , одинаковую постоянную фазу и ту же форму световой кривой, что и инфракрасное излучение. Именно пульсирующее излучение с периодом P_0 позволило связать разные диапазоны излучения, однозначно установив их принадлежность одному и тому же объекту. Различие пространственных разрешений детекторов радио, инфракрасного и рентгеновского излучений не позволило бы сделать такого заключения. Как мы увидим, и в дальнейшем тест на 4,8-часовую периодичность будет главным критерием принадлежности исследуемого потока источнику Лебедь X-3.

Избыточные потоки γ -квантов высоких (~10⁸ эВ)¹⁸ и сверхвысоких ($>10^{12}$ эВ)¹⁹ энергий от района Лебедя X-3 были зарегистрированы еще в сентябре — октябре 1972 г., когда источник пребывал в активном состоянии. Однако точная привязка измеренного γ -излучения к источнику была проведена позднее, через несколько лет, когда накопленный материал позволил надежно установить пульсирующий характер γ -излучения с тем же периодом P_0 ^{20,21}.

Форма пульсирующего излучения в γ -диапазоне существенно отличалась от инфракрасной и рентгеновской световых кривых: вместо плавной синусоиды наблюдались отдельные узкие импульсы. Их длительность составляла ~0,2 P_0 для γ -квантов высоких энергий и даже ~0,05 P_0 для сверхжесткого γ -излучения. Ширина импульса для энергий $E \geq 10^{12}$ эВ составляла всего 15 мин! Оказалась переменной и амплитуда импульсов. В среднем она была больше в периоды повышенной активности объекта в радиоизлучении, хотя прямой корреляции с радиовспышками, как и в рентгене, замечено не было.

Новая волна интереса к Лебедю X-3 поднялась в начале 80-х годов — в результате открытия у него второго, более длительного, периода $P_1 = 34$ дня^{22,23}, показавшего, что источник богаче и сложнее, чем представлялось ранее. Уточнение формы рентгеновской световой кривой²⁴ и подтверждение узких импульсов сверхжесткого γ -излучения другими научными группами²⁵⁻²⁷, которые до этого давали лишь верхние пределы потока, еще более обострили интерес. Последним в этой цепи открытий, связанных с Лебедем X-3 (но надеемся, не окончательным) стало обнаружение от него ультравысокого γ -излучения (10¹⁵ — 10¹⁶ эВ) установками по изучению широких атмосферных ливней^{28,29}. Все эти факты еще раз подчеркнули необычность, уникальность и сложность источника Лебедь X-3. Они стимулировали появление значительного числа теоретических моделей источника. Стало очевидным, что Лебедь X-3 является одним из самых мощных источников в Галактике. Большая часть энергии источника выделяется в жестких диапазонах спектра. Его светимость в рентгеновских и γ -лучах находится на уровне 10³⁷ — 10³⁸ эрг/с и остается высокой вплоть до ультравысоких энергий. Это первый случай в астрофизике, когда наблюдается объект, в котором на наших глазах генерируются частицы с энергиями до 10¹⁶ эВ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Перейдем к детальному изложению экспериментальных данных по Лебедю X-3, полученных за 10 лет наблюдений в разных диапазонах электромагнитного спектра. Для лучшего понимания результатов наблюдений в ряде

случаев нам придется сразу же приводить их качественное объяснение. Более полная трактовка наблюдательных данных будет дана в разделе, посвященном моделям источника.

а) Радиодиапазон

Объект, вспыхнувший в радиодиапазоне 2 сентября 1972 г., ранее был известен как слабый переменный радиоисточник³⁰. Его флюктуирующий поток измерялся в течение 1972 г. и за два дня до вспышки был на уровне

$0,01 - 0,04 \text{ Ян}^*)$ в интервале частот $2 - 8 \text{ ГГц}$ ³¹. Во время вспышки поток резко возрос, более чем в 10^3 раз, а затем плавно спадал в течение нескольких дней. Максимальное значение потока в том же интервале частот было $F_1 = 22 \text{ Ян}^{10,32}$ и $F_2 = 14 \text{ Ян}^{33}$ соответственно для вспышек 2—11 сентября и 19—26 сентября. На рис. 1 показаны временные профили вспышек по изменениям на более низких частотах (365 и 408 МГц). Видно, что вторая вспышка выглядит заметно более мощной, чем первая. На самом деле она представляла собой сложное явление, состоявшее из трех отдельных вспышек, следовавших с интервалом в несколько дней, что было особенно заметно на высоких частотах³⁴.

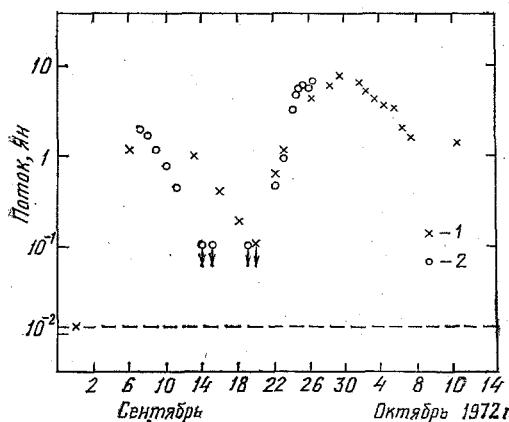
Рис. 1. Изменения потока радиоизлучения Лебедя X-3 в сентябре 1972 г.¹⁰. Штриховая линия — уровень излучения в спокойном состоянии: 1 — $v = 365 \text{ МГц}$, 2 — $v = 408 \text{ МГц}$

Лебедя X-3^{3,4}, вспышечное радиоизлучение объясняется синхротронным излучением в магнитном поле источника облака релятивистских электронов, выброшенных из объекта. Свидетельства в пользу синхротронной природы радиоизлучения были получены в результате измерений частотного спектра радиовспышек и линейной поляризации излучения.

1) Частотный спектр

На рис. 2 показаны временные профили радиоизлучения на отдельных частотах, измеренные во время первой сентябрьской вспышки³⁴. На каждой частоте поток сначала возрастает до некоторого максимального значения, после которого наступает плавное уменьшение потока во времени. Максимум парциального потока вначале достигается на высоких частотах. В то время как в интервале $8,1 - 10,5 \text{ ГГц}$ поток уже убывал, на частотах $1,4 - 5,0 \text{ ГГц}$ он еще продолжал расти. Наблюдаемые закономерности можно объяснить изменением по мере расширения облака его оптической толщины $\tau = R/l$, где R — радиус облака, l — длина свободного пробега фотонов. Так как в радиодиапазоне l растет с частотой излучения, оптическая толщина всегда меньше для высокочастотного излучения. Пока размер облака мал, а его плотность велика, оно непрозрачно для радиоизлучения всех частот — случай оптически толстого источника ($\tau \gg 1$). Поток излучения из оптически толстого источника возрастает со временем как R^2 , пропорционально увеличению излучающей поверхности. Когда вследствие расширения облака

*) 1 Ян (янский) — единица измерения спектральной плотности потока, равная $10^{-26} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{ Гц}^{-1} \text{стер}^{-1}$.



и уменьшения его плотности l сравняется с размером R , облако станет оптически тонким ($\tau \ll 1$). Излучение свободно выходит из облака, и поток достигает максимального значения. Дальнейшее расширение оптически тонкого облака приводит к уменьшению энергии электронов за счет адиабатических, синхротронных и других потерь, следствием чего станет постоянное падение потока излучения.

Частотный спектр претерпевает за время вспышки существенное изменение. Его эволюция показана на рис. 3³⁴. Первое время после начала вспышки, пока облако оптически толстое для большей части регистрируемых частот, спектр сильно искажен самопоглощением излучения в источнике (кривые 1 и 2).

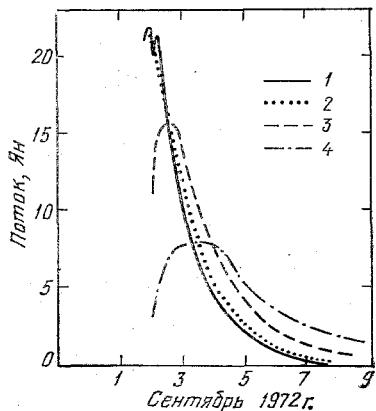


Рис. 2. Временные профили вспышечного радиоизлучения на разных частотах³⁴.

1 — 10,522 ГГц, 2 — 8,085 ГГц, 3 — 2,695 ГГц, 4 — 1,42 ГГц

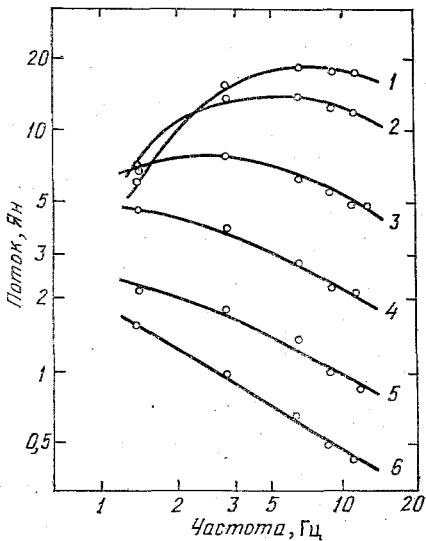


Рис. 3. Эволюция частотного спектра радиоизлучения Лебедя X-3 во время вспышки³⁴: 1 — 3 сентября, 12 час, 2 — 4 сентября, далее всюду 0 час, 3 — 5 сентября, 4 — 6 сентября, 5 — 7 сентября, 6 — 8 сентября

Затем облако становится прозрачным на высоких частотах, излучение на которых выходит без искажения, но остается завал в области низких частот (кривые 3, 4). Наконец, условие $\tau < 1$ достигается для всех регистрируемых частот и излучение покидает облако с неискаженным спектром (кривые 5, 6). Как видно, в этом случае спектр может быть представлен одностепенной зависимостью $I(v) = Av^{-\alpha}$. Именно такой частотный спектр должно иметь синхротронное излучение электронов в постоянном или слабо переменном в пространстве магнитном поле, если энергетический спектр электронов имеет также степенной вид $I(E) = BE^{-\beta}$ ³⁵. Спектральные индексы α и β связаны соотношением $\beta = 2\alpha + 1$. Измерения для ряда вспышек Лебедя X-3 показали, что спектральный индекс радиоизлучения заключен в интервале $\alpha = 0,2—0,6$, из чего следует, что энергетический спектр электронов характеризуется показателем $\beta = 1,4—2,2$ ³².

Следует отметить, что расширяющееся облако содержит, наряду с релятивистскими электронами, тепловую плазму, которая также влияет на поглощение излучения.

2) Поляризация

Обнаружение линейной поляризации вспышечного радиоизлучения подтвердило его синхротронное происхождение. Однако во время первой вспышки степень линейной поляризации на $v = 10,5$ ГГц составляла всего $\eta =$

= 4%³², вместо десятков процентов, предсказываемых теорией³⁵. Этот факт указывает на сильную деполяризацию излучения в результате фардеевского вращения плоскости поляризации в оптически толстой оболочке. Вычисленная при таком предположении плотность электронов плазмы составляла $n_e = 10^7 \text{ см}^{-3}$.

В ряде последующих вспышек степень линейной поляризации оказалась выше, подтверждая как синхротронную природу излучения, так и сделанное предположение о деполяризации в облаке. Так, во вспышке 14 мая 1974 г. было получено $\eta = 14\%$ (на частоте 2,7 ГГц)³², что уже соответствовало случаю оптически тонкой оболочки с электронной плотностью $n_e \approx 10^2 \text{ см}^{-3}$.

Проводились также измерения круговой поляризации радиоизлучения η_c , наличие которой указало бы на анизотропию пинч-углового распределения электронов³⁶, а также могло служить проверкой зарядового состава — отношения числа электронов к числу позитронов в облаке³⁷. Заметной круговой поляризации найдено не было. Полученный верхний предел $\eta_c = 0,5\%$ ³² указывает на симметрию источника: равные вклады давали области разной магнитной полярности с противоположными значениями круговой поляризации.

3) Положение источника

Расстояние до Лебедя X-3 было определено по поглощению радиоизлучения в межзвездном атомарном водороде. Атомарный водород, составляющий основную часть межзвездного газа, резонансно поглощает излучение с длиной волны 21 см. В результате дифференциального вращения Галактики возникает допплеровское смещение линий поглощения от разных частей Галактики и они сливаются в полосу поглощения, по ширине которой и можно оценить расстояние до объекта. Подобные измерения требуют высокой спектральной точности, и первые попытки^{10,11,38} дали только верхний предел, судя по которому источник находится внутри Галактики. Позднее более тщательные измерения привели к установлению конечного расстояния до объекта $r = 10,0 \pm 1,5$ кпс³³. Однако точность этих измерений подвергается сомнению. Есть указания, что источник может быть расположен еще дальше^{39, 142}.

Большая удаленность Лебедя X-3 от земного наблюдателя при регистрируемом потоке излучения приводит к выводу о высокой светимости объекта. Даже в спокойном состоянии светимость радиоисточника составляет 10^{31} эрг/с, а во время вспышек она достигает значения 10^{35} эрг/с. Последняя величина сравнима со светимостью оболочек молодых сверхновых, таких, например, как Кассиопея А.

Угловые размеры источника Лебедь X-3 были определены на радиоинтерферометре VLBI на длине волны 3,6 см: угловой диаметр источника в спокойном состоянии составляет $(13 \pm 2) \cdot 10^{-4''}$ ⁴⁰. Если расстояние до источника принять равным $r = 10$ кпс, то линейный размер излучающей области будет $\sim 2 \cdot 10^{14}$ см. Максимальная база интерферометра составляла 3600 км. Для выяснения структуры объекта нужны интерферометры с еще большей базой.

Небесные координаты Лебедя X-3, измеренные со столь же высокой точностью³², составляют: прямое восхождение α (1950) = $20^{\text{h}}30^{\text{m}}36^{\text{s}},620$; склонение δ (1950) = $40^{\circ}47'12'',85$.

Точное значение координат радиоисточника позволяет провести глубокий поиск объекта в оптическом и инфракрасном диапазонах (см. п. б)).

4) Длительные наблюдения

Систематические наблюдения Лебедя X-3 радиотелескопами продолжаются более 10 лет^{14,32,41-54}. В результате было зарегистрировано большое число вспышек источника. В табл. I приведен список радиовспышек Лебедя

Таблица I

Радиовспышки источника Лебедь X-3 с максимальным потоком больше 1 Ян

Дата, УТ	Частота, ГГц	Максимальный поток, Ян	Литература
Сентябрь 2,5, 1972 г.	10,6	22	10
» 20,6, 1972 г.	5	12	46
» 23,5, 1972 г.	2,7	15	46
» 27,3, 1972 г.	1,4	12	33
Июнь 8,0, 1973 г.	5	3	47
» 14,0, 1973 г.	5	7	47
Июль 1,3, 1973 г.	10,6	7	42
Октябрь 8,2, 1973 г.	10,6	4	48
Декабрь 24,1, 1973 г.	4,2	8	48
» 31,0, 1973 г.	4,2	6	43
Май 13,4, 1974 г.	5	7	47
» 20,0, 1974 г.	8,1	12	32
Декабрь 19,1, 1974 г.	4,2	5	49
Январь 10,0, 1975 г.	5	10	50
» 29,5, 1975 г.	8	7	51
Август 25,0, 1975 г.	5	15	49
Декабрь 18,7, 1977 г.	22	4	52
Сентябрь 26,9, 1980 г.	22	10	53
Октябрь 5,5, 1982 г.	10,7	4	54

X-3 за период 1972—1982 гг.⁴⁵. В среднем вспышки с максимальным потоком $F_{\max} > 1$ Ян происходят раз в полгода. Как правило, вспышки случаются группами, следуя с небольшим промежутком одна за другой. Такие парные и тройные вспышки наблюдались в сентябре 1972 г., июне — июле 1973 г., декабре 1973 г., мае 1974 г. и январе 1975 г. Не установлена какая-либо периодичность в появлении слабых и сильных вспышек. Хорошо видно, что вспышечная активность источника была выше в течение 1972—1975 гг. и заметно снизилась во второй половине 70-х годов. Возможно, именно поэтому так долго не наблюдалась столь мощные вспышки, как в сентябре 1972 г.

Однако в сентябре и октябре 1982 г. последовал ряд вспышек, не уступающий по мощности самым сильным¹⁴³. Максимальная величина потока составила 22 Ян на частоте 8,1 ГГц. Наблюдения на интерферометрах, в том числе и на VLBI, показали, что выброс электронов происходит в двух противоположных направлениях (приблизительно по линии север — юг) с угловой скоростью $0,010 \pm 0,002$ угловые секунды за сутки. Если расстояние до источника принять равным 11,6 кпс (что является нижним пределом, как следует из последних измерений¹⁴²), то скорость разлета электронных облачков составит $u_{\text{раз}} = 0,35c$, где c — скорость света. Таким образом, пучки электронов во время вспышки источника движутся с релятивистскими скоростями, а вся картина вспышечного радиоизлучения Лебедя X-3 очень похожа на то, что наблюдается во внегалактических радиоисточниках, радиогалактиках и квазарах. Просмотр старых записей показал, что вспышечная активность источника существовала и раньше, например, в 1964—1965 гг., но ее уровень был ниже, чем в 1972—1973 гг.³³.

Длительные наблюдения показали, что каждая вспышка имеет тонкую временную структуру, состоящую из нерегулярной последовательности возрастаний и спадов потока радиоизлучения. Тонкая структура вспышки отражает индивидуальные особенности электронных выбросов — их временные, пространственные и спектральные характеристики, и нуждается в подробном изучении и сопоставлении с моделями вспышечного источника. Первые модели радиовспышки Лебедя X-3, основанные на механизме син-

хротронного излучения облака релятивистских электронов в магнитном поле нестационарной звезды, были рассмотрены в работах^{34,55,56}. Анализ наблюдательных данных по первой сентябрьской вспышке в рамках предложенной модели показал, что масса облака, выброшенного за один день, составила $0,7 \cdot 10^{-8} M_{\odot}$, где M_{\odot} — масса Солнца⁵⁵.

б) И н ф р а к р а с н ы й д и а п а з о н

Поглощение и рассеяние света в слое газа и пыли, расположенному между источником и земным наблюдателем, препятствуют оптическому отождествлению Лебедя X-3. В ближней инфракрасной области спектра газопылевая среда более прозрачна. Поэтому на больших наземных телескопах были предприняты попытки найти инфракрасный объект с небесными координатами источника. Наблюдения в I-полосе ИК спектра (средняя длина волны 0,85 мкм) не обнаружили звездного объекта вплоть до видимой величины $17,5^m$ ^{13,39,57}. На более длинных волнах, в H- и K-полосах ИК спектра (средние длины волн — 1,6 и 2,2 мкм соответственно) источник был обнаружен в серии наблюдений, проведенных на 200-дюймовом телескопе в 1972—1973 гг.^{12,14}.

Инфракрасное излучение Лебедя X-3 сильно переменно: наблюдаются спорадические вспышки длительностью от минут до часов, а также периодическая модуляция излучения^{12,14}. Периодическая составляющая, доля которой в общем ИК потоке составляет $\sim 10\%$, имеет период $P_0 = 4,8$ ч и почти синусоидальную форму световой кривой. P_0 выдерживается с такой же высокой точностью, как периоды пульсаров, и в то же время намного превосходит их по величине. Естественно предположить, что P_0 представляет собой орбитальный период двойной системы. В таком случае это очень тесная двойная система, в которой звезды находятся на среднем расстоянии $a \approx 10^{11}$ см.

Сравнительно недавно Лебедь X-3 был обнаружен и в ближней полосе ИК диапазоне, в интервале длин волн 0,8—1 мкм. Наблюдения проводились на двух телескопах обсерватории Маунт Гопкинс⁶⁰. Изображение в фокусе телескопа фиксировалось матрицей ПЗС, состоящей из 512×320 ячеек, каждая размером 30×30 мкм². Для уменьшения темнового тока матрица охлаждалась до температуры -155°C и работала в линию с ЭВМ. В четырех экспозициях виден звездный объект, положение которого совпадает с радиоисточником с точностью до $1''$. Лебедь X-3 проецируется на спиральный галактический рукав, и потому в поле зрения попадает сравнительно много звезд. Видимая величина объекта $17^m,0 \pm 0^m,2$. Есть указание на ее переменность за временной интервал в два месяца. Отчетливо видна 4,8-часовая периодичность, достигающая по амплитуде 30%.

По звездам галактического поля и соседнего шарового скопления M67 проводилась калибровка детектора ПЗС. Измерив видимые звездные величины объекта в K-, R- и I-полосах спектра по их разностям $\Delta m_{\text{K}} = 5,6$, $\Delta m_{\text{R}} = 3,6$, используя метод покраснения⁶¹, находят количество атомов водорода на луче зрения. Этот метод определяет полное количество атомов водорода — как в атомарной форме (области HI), так и в форме молекул (плотные холодные облака газа) — по пути от источника к наблюдателю. Измеренная величина $N_{\text{IK}} = 3 \cdot 10^{22}$ ат/см² находится в хорошем согласии с аналогичной величиной N_{X} , определенной по поглощению мягкого рентгеновского излучения в источнике^{6,7}, и приблизительно в два раза больше значения N_{R} , найденного по самопоглощению радиоизлучения³³. Полученные результаты качественно можно понять следующим образом: в то время как инфракрасное и рентгеновское излучения исходят из одной и той же пространственной области источника, его радиоизлучение генерируется в другом месте, ближе к периферии объекта.

Проведенные инфракрасные наблюдения источника относились к его спокойному состоянию. Если бы удалось провести их в момент вспышки источника с одновременными измерениями рентгеновского излучения, полученные результаты существенно ограничили бы выбор моделей источника.

в) Рентгеновское излучение

Хотя радио и инфракрасные наблюдения впервые указали на ряд важных особенностей объекта, наиболее детальные исследования Лебедя X-3 были проведены в рентгеновском диапазоне. Обилие информации о рентгеновском излучении объекта обусловлено не только физическими причинами — высокой активностью источника в жестком излучении, большой проникающей способностью, но и чисто наблюдательными возможностями современной астрономии. Ни одна отрасль наблюдательной астрономии не развивалась в последнее время столь стремительно, как рентгеновская астрономия. Лебедь X-3 был одним из наиболее часто наблюдавшихся объектов: его экспозиция орбитальными телескопами составляла недели и месяцы, что в итоге и принесло огромный объем информации. Наблюдения проводились рентгеновскими телескопами разных типов, перекрывшими весь рентгеновский диапазон от ~ 1 кэВ до ~ 400 кэВ по энергии фотонов, причем во всем этом интервале были измерены конечные потоки. Исключение составил лишь интервал мягкого рентгена ($0,1$ — 1 кэВ), в котором конечный поток получен не был — по причине сильного поглощения в межзвездном газе (длина свободного пробега фотона с энергией 200 эВ составляет ~ 50 пс⁶²).

В области «классического» рентгена (2—12 кэВ) наиболее подробные результаты были получены с помощью рентгеновского телескопа европейского спутника COS-B^{24,63}, в течение 6,5 лет непрерывно работавшего на орбите (1975—1981 гг.). За это время было проведено четыре месячных экспозиции участка неба, где расположен Лебедь X-3: в ноябре 1975 г., июне 1977 г., ноябре 1978 г., мае — июне 1980 г. Эффективности отдельных наблюдений отличались друг от друга, так как каждый раз ось телескопа направлялась не строго на источник, а в точку, отстоявшую на несколько градусов. Это делалось, в частности, для того, чтобы в угол зрения телескопа не попадал поток соседнего более яркого рентгеновского источника Лебедь X-1.

1) Периодический компонент

Пульсирующее с периодом $P_0 = 4,8$ ч излучение проявляется в рентгеновском сильнее, чем в ИК диапазоне: амплитуда периодического компонента составляет по отношению к постоянному уровню почти 100 %. На рис. 4 показана усредненная по многим импульсам световая кривая²⁴. То, что вначале принималось за синусоиду, на самом деле заметно отличается от нее. Кривая асимметрична относительно максимума, у нее более пологий подъем и более крутой спад. Такой вид световой кривой обусловлен геометрией двойной системы и должен быть учтен при построении модели источника.

Периоды P_0 и начальные фазы ϕ_0 совпадают во всех измеренных диапазонах. Лучшие по точности значения P_0 и ϕ_0 приведены в табл. II. Период P_0 измерен с точностью до восьмого знака. Период P_0 возрастает со временем: получено значение первой производной периода, которая по совокупности измерений^{16,17,64} составляет $\dot{P}_0 = (1,2\text{---}3,7) \cdot 10^{-9}$. С этим значением согласуется результат, полученный недавно орбитальной станцией EINSTEIN: $\dot{P}_0 = (1,8 \pm 0,4) \cdot 10^{-9}$ ⁶⁵. Таким образом, относительное изменение периода составляет $\dot{P}_0/P_0 = 3 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹.

Длительные наблюдения источника показали, что со временем изменяются также амплитуда периодического компонента I_1 и величина непуль-

Таблица II

Характеристики периодического излучения источника Лебедь X-3

Диапазон	Период P_0 , сут	Начальная фаза, JD	Производная периода P_0	Период P_1 , сут
Инфракрасное излучение	0,199679 (7) ¹⁴	2441872,820 ¹⁴		
Рентгеновское излучение (2—12 кэВ)	0,1996830 (4) ¹¹¹	2440949,8986 ¹¹¹	(1,18±0,14)·10 ⁻⁹ ¹¹¹	34,1±0,1 ²²
γ-излучение (~10 ⁸ эВ)	0,199686 (5) ⁸⁰	2440949,917 ⁶⁴		
γ-излучение (~10 ¹² эВ)	0,199683 (1) ¹⁰¹	2441550,542 ¹⁰¹	(3,0±1,4)·10 ⁻⁹ ¹⁰¹	34,02 ⁸⁶
γ-излучение (~10 ¹⁵ эВ)	0,1996816(2) ²⁸	2440949,9176 ²⁸		34? ²⁸

сирующего постоянного потока I_0 . На рис. 5 показаны совместные измерения I_0 и I_1 во время двух экспозиций источника телескопом COS-B²⁴. Изменения потоков носят немонотонный характер с хорошо заметной корреляцией между I_0 и I_1 . В общем случае зависимость нелинейная, в результате чего амплитуда периодического компонента может сильно возрастать даже при сравнительно небольшом увеличении постоянного потока.

Временным изменениям подвержена и сама форма световой кривой.

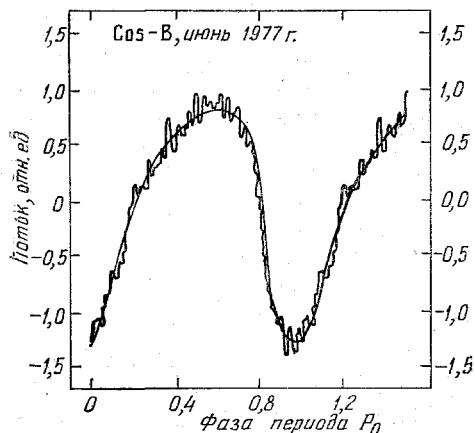


Рис. 4. Средняя световая кривая рентгеновского излучения Лебедя X-3 с периодом $P_0 = 4,8$ ч²⁴

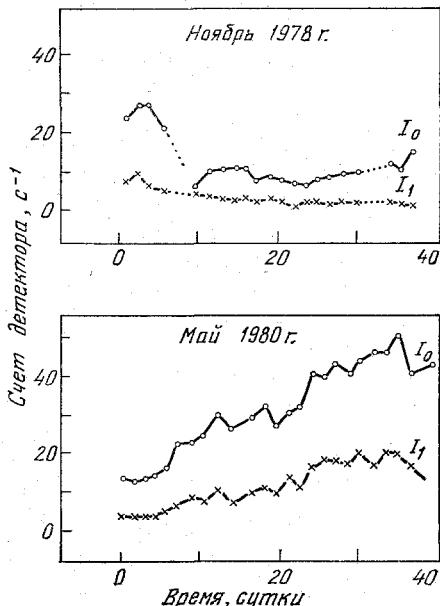


Рис. 5. Изменение во времени постоянного (I_0) и периодического (I_1) компонентов рентгеновского излучения источника²⁴

Она сохраняется и совпадает с показанной на рис. 4, если проводить усреднение за сравнительно большие интервалы времени, не менее месяца. За меньшие интервалы наблюдения форма световой кривой существенно варьирует от измерения к измерению, как следует из рис. 6, на котором приведены результаты четырех недельных экспозиций источника²⁴. Вариации формы световой кривой заключаются в изменении ее асимметрии и смещении положения максимума. Иногда асимметрия полностью исчезала — кривая становилась практически симметричной. Замечено, что вариации формы световой кривой коррелируют с уровнем I_0 : кривая становится более симметричной при возрастании I_0 . Когда интенсивность I_0 достигает определен-

ного уровня (~ 30 имп/с в счете детектора COS-B²⁴), световая кривая становится симметричной. Следует отметить, что указанные вариации световой кривой рентгеновского излучения относятся к области ее максимума, в то время как вблизи минимума ее форма постоянна и не зависит от уровня I_0 .

Качественно наблюдающиеся закономерности рентгеновского излучения Лебедя X-3 можно объяснить следующим образом. Асимметрия световой

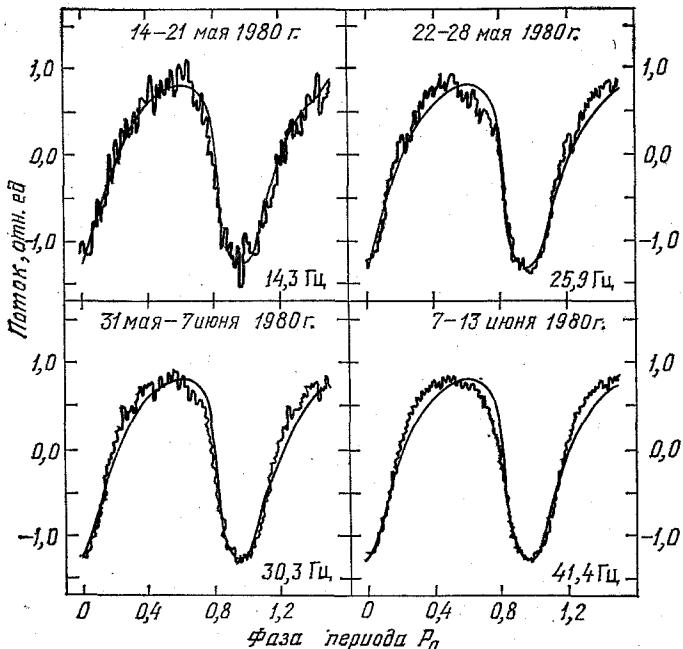


Рис. 6. Световые кривые периодического рентгеновского излучения источника для четырехнедельных экспозиций²⁴

кривой, по-видимому, обусловлена эксцентриситетом орбитального движения двойной системы. Ее плавная форма, резко отличающаяся от затменных кривых рентгеновских пульсаров^{4,66}, указывает на большое количество газа, рассеивающего рентгеновские фотоны, в самой двойной системе или в ближайшем окружении источника. Рентгеновское излучение от источника проходит через поглощающую и рассеивающую среду и, следовательно, регистрируемый поток складывается из двух парциальных потоков — прошедшего и рассеянного, что можно записать в виде

$$I = I_{\text{пер}} [f(\varphi) e^{-\tau} + g(\varphi) (1 - e^{-\tau})], \quad (1)$$

где $f(\varphi)$, $g(\varphi)$ — некоторые функции фазы периода P_0 , отражающие эксцентрическое движение рентгеновского источника по орбите, τ — оптическая толщина газа, $I_{\text{пер}}$ — первичный поток рентгеновского излучения от внутреннего источника. Подобной переработкой рентгеновского излучения внутреннего источника на окружающем газе можно объяснить наблюдаемую форму и вариации световой кривой. Количественное согласие можно получить, предполагая, что τ зависит от величины $I_{\text{пер}}$ и изменяется в пределах 0,5—2. Подобное объяснение дается в модели звездного ветра, истекающего от звезды-компаньона и обусловливающего активность рентгеновского источника⁵⁶.

2) Долгопериодические вариации

Рентгеновские измерения обнаружили большое разнообразие временных характеристик Лебедя X-3. Кроме пульсаций с периодом P_0 , медленно возрастающих со временем, кратковременных спорадических флюктуаций и долговременных изменений уровня I_0 были обнаружены вариации с периодом $P_1 = 34$ сут^{22,23}. Указания на долгопериодические вариации содержались еще в работах^{24,67}, но окончательный результат был получен при анализе данных рентгеновского телескопа COS-B²². Оказалось, что время наступления минимума t_{\min} периодического компонента $I_1(t)$ отклоняется от ожидаемого на величину Δt , которая колеблется с амплитудой $t_0 \sim 200$ с и периодом $P_1 = 34,1 \pm 0,1$ сут. Наблюдаемые изменения Δt могут быть связаны с периодическими изменениями расстояния между рентгеновским источником и наблюдателем. В таком случае величина $c t_0 = 6 \cdot 10^{12}$ см представляет размер системы по лучу зрения и может быть использована для определения ориентации наблюдателя относительно двойной системы Лебедь X-3.

Период P_1 должен проявляться и в интенсивности рентгеновского потока. Однако в интервале энергий 2—12 кэВ, где период P_1 был первоначально обнаружен, изменение интенсивности потока с фазой ϕ периода P_1 оказалось очень слабым²². Это можно было объяснить большим фоном от рассеяния на окружающем газе. В таком случае с ростом энергии фотонов и уменьшением вклада от фонового потока зависимость рентгеновского излучения от фазы ϕ должна проявляться все более отчетливо, что и наблюдается на самом деле. По данным спутника OSO-8, регистрировавшего фотоны с энергией 20—110 кэВ²³, поток определенно зависит от фазы ϕ . Существуют два интервала фаз ϕ . В течение первого интервала ($\phi = 0,3—0,8$) периодический компонент с периодом P_0 хорошо заметен и его доля составляет $\sim 50\%$ — это интервал «благоприятных» фаз. Во втором интервале ($\phi = 0—0,3$ и $0,8—1$ — «неблагоприятные» фазы) периодическое излучение вообще не наблюдалось, а анализ показал, что его доля не превышает 25 %. Другие наблюдения источника в жестком рентгеновском излучении^{68,69} не противоречат сделанному выводу, хотя и содержат меньший статистический материал. Выделение периода P_1 и разбиение его на «благоприятные» и «неблагоприятные» фазы становится еще более определенным и достоверным в диапазоне γ -излучения сверхвысоких энергий (см. п. д) гл. 3).

[3] Энергетический спектр

Спектрометрические измерения Лебедя X-3 проводились во всех интервалах рентгеновского излучения. На рис. 7 показан дифференциальный спектр источника. Со стороны низких энергий виден завал спектра, связанный, по-видимому, с поглощением излучения в источнике, хотя эти результаты еще очень неопределены. Остальную часть спектра можно представить экспоненциальной зависимостью $e^{(E-E_0)/kT}$ ($kT = 20$ кэВ), представляющей тепловое излучение плазмы, быстро убывающее с энергией фотонов и потому описывающее сравнительно мягкую часть спектра, и степенной зависимостью $(E/E_0)^{-\alpha}$, характеризующей жесткую часть спектра^{70,71}. Спектральный индекс α заметно варьирует от измерения к измерению. Возможно, частично эти вариации связаны с зависимостью α от фазы ϕ периодического компонента. Согласно⁷⁰, для интервала фаз $\phi = 0,18—0,60$ спектральный индекс равен $\alpha = 3,6 \pm 0,3$. Измерения же⁷² показали, что в интервале фаз $\phi = 0,45—0,90$ спектр существенно более жесткий и характеризуется показателем $\alpha = 2,2$. Экстраполяция такого спектра в область больших энергий хорошо согласуется с данными, полученными в диапазоне γ -излучения. По измерениям на спутнике UHURU⁸ средняя интенсивность рентгеновского излучения источника была 385 имп/с, что в переводе на поток энергии составляет F_p (2—10 кэВ) = $9,2 \cdot 10^{-9}$ эрг/см² с. Приняв расстояние

до источника равным 11,6 кпс¹⁴², получим его рентгеновскую светимость L_p (2–10 кэВ) = $1,4 \cdot 10^{38}$ эрг/с.

Недостатком спектральных рентгеновских измерений является то, что они проводились разными приборами, в разное время и без разделения периодического и «постоянного» потока. По этим данным можно сделать заключение только о среднем спектре источника, в то время как из предыдущего изложения ясно, что временные вариации спектра могут быть очень существенными. Согласно наблюдениям^{14,17,73} рентгеновский поток от источника флюктуирует постоянно, однако во время радиовспышек не происходит больших изменений интенсивности потока и его спектра.

Изучение отдельных линий в рентгеновском спектре Лебедя X-3 еще только начинается. Достоверно наблюдалась пока лишь линия железа $E = 6,7$ кэВ, интенсивность которой составляла $1,8 \pm 0,4$ фот/см²с⁷¹.

г) γ -излучение высоких энергий (10^7 – 10^{10} эВ)

Исследования Лебедя X-3 в диапазоне γ -лучей представляет, по нашему мнению, наибольший интерес. Характеристическое γ -излучение в линиях (0,1–10 МэВ) и γ -излучение более высоких энергий, образующееся при взаимодействии ускоренных частиц с веществом, могут предоставить ценную информацию об источнике, касающуюся его соста-

ва, физического состояния, процессов ускорения и излучения. В настоящее время измерения в интервале мягкого γ -излучения находятся в начальном состоянии, а спектроскопические измерения γ -линий еще практически не проводились. Даже для такой относительно «яркой» линии, как линия электронно-позитронной аннигиляции, нет определенного результата.

Значительно лучше исследован интервал γ -квантов высоких энергий. Еще на первом этапе исследований, проводимых с высотных аэростатов, из района созвездия Лебедя регистрировались избыточные над атмосферным фоном потоки γ -квантов^{75–78}, однако вследствие невысокого углового разрешения телескопов не удалось однозначно установить источник излучения. Впервые избыточный поток γ -квантов был отнесен к источнику Лебедь X-3 в работе¹⁸.

Угловое разрешение γ -телескопа с искровыми камерами, усредненное по спектру регистрируемого потока, составляло $\Delta\theta = 3,5^\circ$ ⁷⁹. Отождествление источника в круге с радиусом $\Delta\theta$ основывалось исключительно на пекуллярности Лебедя X-3, пребывавшего в это время, как следовало из радионаблюдений, в активном состоянии. Кроме того, результаты первого наблюдения, проведенного 12.10.1972 г., не противоречили предположению о прохождении через угол зрения телескопа, ориентированного в зенит, одиночного дискрет-

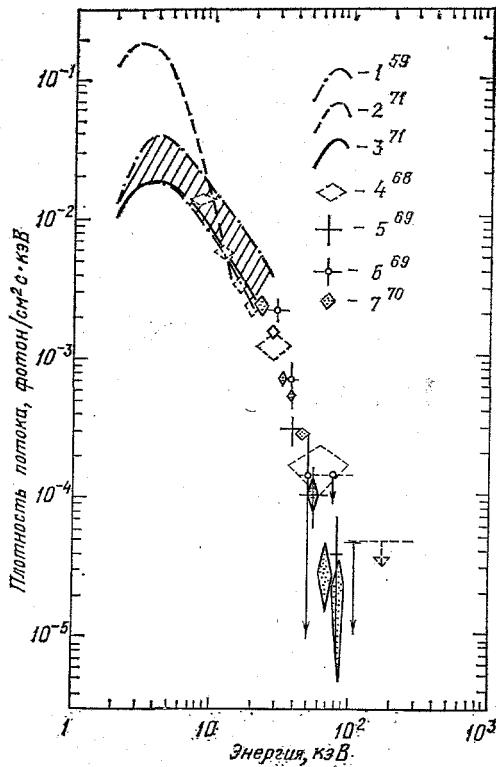


Рис. 7. Дифференциальный энергетический спектр рентгеновского излучения Лебедя X-3.

1 — по 59, 2 — 71, 3 — 71, 4 — 68, 5 — 69, 6 —

ногого источника. Избыточный поток γ -квантов превышал атмосферный фон на $3,6\sigma$, где σ — стандартное отклонение.

Тем же γ -телескопом на аэростате источник наблюдался еще дважды: 10.7.1974 г. и 5.7.1976 г., каждый раз в течение приблизительно 5 часов⁸⁰. Совокупность трех наблюдений дала дополнительные доводы в пользу первоначального отождествления избыточного потока γ -квантов с источником Лебедь X-3. Полученные результаты показаны на рис. 8. Во всех трех наблюдениях регистрировались импульсы γ -излучения длительностью ~ 1 ч в одинаковой фазе периода P_0 ($\phi = 0-0,2$). Избыточного излучения на других фазах, выходящего за естественные флуктуации атмосферного фона, не наблюдалось. Отсюда можно сделать заключение, что существует периодическое γ -излучение с таким же периодом P_0 , как и в рентгеновском излучении. Положение трех импульсов γ -квантов на временном интервале 3,7 года позволило уточнить значение периода: $P_0(\gamma, 10^8 \text{ эВ}) = 0,199686$ (5) сут, что находится в хорошем согласии как с рентгеновским периодом, так и с периодом, определенным по γ -излучению сверхвысоких энергий (см. табл. II). Пульсирующий характер γ -излучения однозначно отождествляет его с источником Лебедь X-3, несмотря на сравнительно невысокую угловую точность наблюдений.

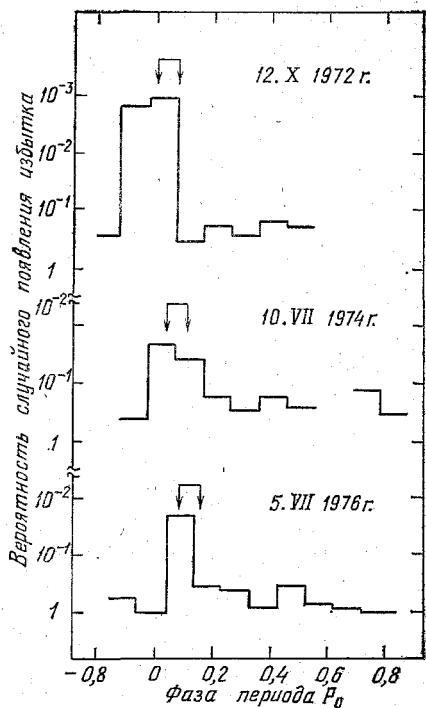


Рис. 8. Результаты наблюдения Лебедя X-3 γ -телескопом на аэростате ($E_\gamma > 4 \cdot 10^7$ эВ)⁸⁰.

Стрелками показано положение пиков в интервале сверхвысоких энергий

меньше (в ~ 3 раза при сопоставимых энергиях) и импульс γ -излучения попал на фазу $\phi = 0,5-0,8$ периода P_0 .

В ряде наблюдений на аэростатах γ -излучения Лебедя X-3 не было обнаружено⁸²⁻⁸⁴. Однако продолжительности этих измерений были невелики, так что возможно, импульс излучения не попал на время экспозиции. Полученные верхние пределы не сильно отличаются от потоков, измеренных в работах^{80,81}. Более серьезным фактом следует считать отсутствие положительного эффекта при наблюдении Лебедя X-3 спутником COS-B⁸⁵. В пяти экспозициях района источника, проведенных в течение 1975—1980 гг., не было обнаружено γ -излучения с периодом P_0 . Верхний предел потока на уровне 2σ составляет $I_{\text{вп}} (\geq 50 \text{ МэВ}) = 3 \cdot 10^{-6}$ фот/ $\text{см}^2 \text{с}$ ⁸⁵. Этот результат находится в явном противоречии с результатами измерений^{80,81}, если импульс излучения постоянен во времени. Если же γ -излучение, так же как и рентгеновское, переменно, результаты всех измерений можно согласовать между собой, предположив, что в течение 1975—1980 гг. интенсивность периодиче-

Усредненный по трем измерениям и по периоду P_0 поток составляет $I (> 4 \cdot 10^7 \text{ эВ}) = (6,4 \pm 2,7) \cdot 10^{-5}$ фот/ $\text{см}^2 \text{с}$. В первом измерении, когда источник находился в особо активном состоянии, измеренный поток был приблизительно в два раза больше среднего.

Гамма-излучение Лебедя X-3 в том же интервале энергий было измерено также спутником SAS-2⁸¹. Был подтвержден его пульсирующий характер с периодом P_0 , но обнаружились и некоторые различия — поток оказался

ского компонента γ -излучения была в несколько раз ниже, чем за период 1972—1975 гг. Интересно отметить, что качественно такая же картина уменьшения интенсивности источника во второй половине 70-х годов следует также из радиоданных (см. табл. I) и возможно, из результатов измерения γ -излучения сверхвысоких энергий⁸⁶.

Следует также учесть возможную модуляцию потока γ -квантов, связанную с существованием у источника длительного периода P_1 , с его «благоприятными» и «неблагоприятными» фазами. Анализ показал, что в то время как все три аэростатные наблюдения Лебедя X-3⁸⁰ попали в интервал «благоприятных» фаз, измерения со спутников SAS-2⁸¹ и COS-B⁸⁵ проводились частично во время «неблагоприятных» фаз. С учетом этого обстоятельства расхождения по интенсивностям потоков γ -квантов, измеренных разными группами, существенно уменьшаются. Анализ периодического γ -излучения, проведенный в¹⁴⁵, позволил еще теснее увязать между собой результаты разных наблюдений источника, казавшихся вначале несовместимыми. Из него также следует, что импульсы γ -излучения высоких и сверхвысоких энергий появляются в двух местах фазовой кривой периода P_0 : на фазе $\phi \approx 0,2$, если фаза периода P_1 заключена в интервале $\psi \approx 0-0,5$, и вблизи фазы $\phi \approx 0,6$, когда $\psi \approx 0,5-1$. Импульс излучения, таким образом, «блуждает» по фазовой кривой, что ранее не наблюдалось у источников высокоэнергетичного излучения. Этот факт, несомненно, очень важен как для согласования результатов разных наблюдений, так и для выяснения природы Лебедя X-3.

Светимость Лебедя X-3 в γ -излучении очень велика — она намного превышает светимости других известных галактических источников γ -излучения. При изотропном характере излучения светимость источника составляет $L_\gamma (\geq 40 \text{ МэВ}) = 3 \cdot 10^{38}$ эрг/с, что равно $\sim 10\%$ светимости всей Галактики в этом энергетическом интервале! Если принять, что излучение источника сосредоточено в угле ~ 1 стер, как предполагается в некоторых моделях пульсаров^{87 88}, светимость Лебедя X-3 составит величину, приблизительно на порядок меньшую. В любом случае она в 10^2 и 10^3 раз выше γ -светимости молодых пульсаров PSR 0531 + 21 (в Крабовидной туманности) и PSR 0833-45 (в Парусах-X) соответственно. Ясно, что таких ярких источников должно быть немного в Галактике. В противном случае подавляющая часть γ -светимости Галактики создавалась бы ими, а не диффузной компонентой, возникающей в результате взаимодействия космических лучей с межзвездным газом, как считается в настоящее время. Согласно оценкам⁸⁹⁻⁹¹ вклад дискретных источников в общий галактический поток γ -излучения при этих энергиях не превышает 50%.

д) γ -излучение сверхвысоких энергий ($10^{12} - 10^{14}$ эВ)

При энергиях квантов порядка 1 ТэВ поток от Лебедя X-3 делается таким низким, что наблюдения могут проводиться только путем регистрации вторичных эффектов электромагнитных каскадов, развивающихся в атмосфере (детектор с площадью 1 м² на борту спутника регистрировал бы при $E = 1$ ТэВ не более 1 кванта в неделю). Все исследовательские группы, проводившие наблюдения при указанных энергиях, использовали технику регистрации черенковских вспышек широких атмосферных ливней (ШАЛ), разработанную Гэлбраитом и Джелли^{92,93} и впервые примененную для систематических измерений А. Е. Чудаковым с сотрудниками⁹⁴. Основная идея этой методики состоит в регистрации с помощью оптической системы с ФЭУ слабой и довольно короткой (< 3 нс) световой вспышки, сопровождающей развитие ШАЛ. Свечение обусловлено черенковским излучением электронов (позитронов) и происходит преимущественно в направлении прихода первичной частицы. В таких измерениях дискретный источник излучения обнаруживается при сравнении скорости счета черенковских вспышек в направ-

лении исследуемого объекта и на некотором небольшом угловом расстоянии от него (фон, обусловленный космическими лучами). Успешные наблюдения с помощью черенковской методики могут проводиться только в безлуные ночи с хорошими метеоусловиями, на сравнительно небольших зенитных расстояниях ($\leq 45^\circ$).

Параметры черенковских детекторов, на которых проводились наблюдения Лебедя X-3, представлены в табл. III. Некоторые особенности перечисленных здесь экспериментальных установок необходимо учитывать при сравнении результатов наблюдений, указанных в последних колонках таблицы.

В рассмотренном диапазоне энергий Лебедь X-3 был впервые обнаружен на установке КрАО АН СССР в сентябре 1972 г.^{19,95,96}. На протяжении нескольких последующих лет наблюдения источника в области сверхвысоких энергий проводились только в КрАО. Далее, с 1977 г. источник успешно наблюдался на установке ФИАН. В 1980 г. Лебедь X-3 был надежно обнаружен исследователями в США (см. табл. III).

Наблюдения Лебедя X-3 на установке КрАО продолжались до 1980 г. включительно, благодаря чему группой КрАО накоплен по этому объекту большой объем данных. Эти данные представляют собой в общем довольно однородный ряд наблюдений, поскольку за весь девятилетний интервал измерений^{86,97-104} в установку не вносилось существенных изменений (в 1974 г. была лишь изменена процедура наблюдений: простое сканирование было заменено более эффективным попаренным измерением «источник — фон»). Наиболее важным результатом систематических наблюдений Лебедя X-3 является вывод о высокой степени переменности потока γ -излучения от этого объекта. Это свойство сильно затрудняет сопоставление результатов, полученных на разных установках, поскольку измерения, как правило, разновременны.

Основные итоги наблюдений Лебедя X-3 в КрАО сводятся к следующему:

1. Средняя величина потока составляет $I (\geq 2 \cdot 10^{12} \text{ эВ}) = 1,8 \pm 0,5 \cdot 10^{-11} \text{ фот}/\text{см}^2\text{с}$. Светимость источника (при расстоянии до него 11,6 кпс) составляет $L_\gamma (> 2 \cdot 10^{12} \text{ эВ}) = 5 \cdot 10^{36} \text{ эрг}/\text{с}$.

2. Практически во все годы выделяется период $P_0 = 4,8 \text{ ч}$. Его среднее значение, найденное по данным 1972—1977 гг., составляет 0,199683 (1) сут, что совпадает со значением, полученным из рентгеновских наблюдений (см. табл. II). По данным 1972—1979 гг. получена оценка скорости возрастания периода, составляющая $\dot{P}_0 = (3,0 \pm 1,4) \cdot 10^{-9}$ ¹⁰¹. Эта величина хорошо согласуется с полученными позднее значениями \dot{P}_0 по рентгеновским наблюдениям (см. табл. II).

3. На световой кривой периода P_0 (рис. 9) заметно два пика: при значениях фаз $\phi 0,15—0,2$ и $0,6—0,8$ ¹⁰². Возможно, что относительная величина пика изменяется со временем (в 1972—1973 гг. пики были, вероятно, одинаковыми¹⁰³, в последующие годы первый пик стал больше). Средний поток за все время наблюдений для интервала фаз $\phi 0,15—0,2$ составляет $1,6 \cdot 10^{-10} \text{ фот}/\text{см}^2\text{с}$.

4. В некоторые относительно короткие интервалы времени (несколько суток) избыточный поток наблюдался для всех периодов P_0 . Это так называемое спорадическое излучение наблюдалось, в частности, в сентябре 1973 г., августе 1974 г.⁹⁷ и октябре 1980 г.¹⁰⁴.

5. Поток γ -квантов меняется с периодом $P_1 = 34,1 \text{ сут}$ ⁸⁶, наблюдаемым также в рентгеновском²² и радиодиапазонах¹⁰⁵. Минимумы интенсивности всюду совпадают. Световая кривая периода P_0 зависит от фазы ψ периода P_1 (рис. 10). Уменьшение активности источника в 1976—1979 гг. по сравнению с 1972—1975 гг.⁸⁶, возможно, обусловлено наблюдательной селекцией — преимущественным попаданием интервалов наблюдений в течение 1976—1979 гг. на «неблагоприятные» фазы¹⁰⁵.

Таблица III

Результаты исследования источника Лебедь X-3 в диапазоне сверхвысоких энергий ($\geq 10^{12}$ эВ)

Установка	Высота над уровнем моря, м	Оптическая система	Приемный конус, град	Энергетический порог, эВ	Скорость счета, мин	Время наблюдения	Поток, фот/см ⁻² с ⁻¹	
							Среднее значение	Значение в пике
КрАО АН СССР ⁹⁸	600	4 параболических зеркала, $\varnothing 1,5$ м, $f 0,65$ м, на независимой экваториальной установке	1,8	$2 \cdot 10^{12}$	80	Сентябрь 1972 г.—ноябрь 1980 г.	$(1,8 \pm 0,5) \cdot 10^{-11}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$
Тянь-Шаньская станция ФИАН ¹⁰⁶	3000	3 параболических зеркала, $\varnothing 1,5$ м, $f 0,65$ м, на одной азимутальной монтировке	3,0	$2 \cdot 10^{12}$	30	Июль 1976 г.—октябрь 1982 г.	$(7,3 \pm 1,3) \cdot 10^{-11}$	$(9,5 \pm 2,0) \cdot 10^{-11}$
Смитсоновская обсерватория, США ⁵⁸	2300	Ячеистое зеркало, $\varnothing 10$ м, на азимутальной монтировке	1,0	$1 \cdot 10^{12}$	—	Октябрь—ноябрь 1976 г.	$\leq 2,4 \cdot 10^{-11}$	—
Дублинский университет—Смитсоновская обсерватория ²⁶	2300	2 параболических зеркала, $\varnothing 1,5$ м	2,0	$2 \cdot 10^{12}$	—	Апрель—июнь 1980 г.	$\sim 1,5 \cdot 10^{-11}$	$\sim 1,5 \cdot 10^{-10}$
Гелиоэнергетическая установка, США ²⁷	700	2 зеркала гелиостата, $\varnothing 11$ м	1,0—1,8	$5 \cdot 10^{11}$	60	Август—сентябрь 1981 г.	$\sim 8,0 \cdot 10^{-11}$	$\sim 4,0 \cdot 10^{-10}$
Дармский университет, Грейт Солт-Лэйк, США ¹⁰⁹	1450	4 телескопа из 3 параболических зеркал, $\varnothing 1,5$ м каждое	1,7	$2 \cdot 10^{12}$	50	Июль—октябрь 1981 г.	$9 \cdot 10^{-12}$	$7,0 \cdot 10^{-11}$

С перечисленными выше результатами в общем хорошо согласуются итоги пятилетних наблюдений источника на установке ФИАН (1976—1980 гг.^{106,107}).

Наблюдения Лебедя X-3, проведенные в 1980 г. Дублинским университетом совместно со Смитсоновской обсерваторией^{26,108}, еще раз убедительно продемонстрировали переменность источника: весь эффект наблюдался фактически только в первую половину интервала измерений (конец мая — июнь), когда было отмечено усиление его активности в рентгеновском диапазоне. Авторы отмечают, что увеличение потока пришлось на «благоприятную» фазу периода P_1 и совпало с изменением световой кривой периода P_0 .

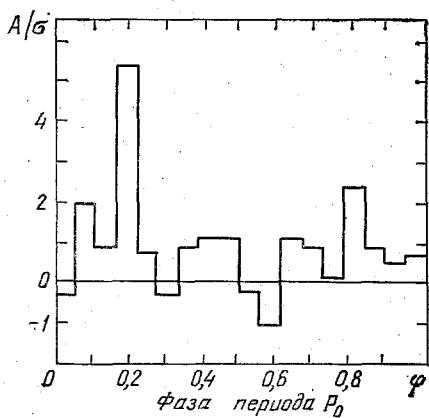


Рис. 9. Световая кривая периода P_0 для γ -излучения сверхвысокой энергии ($>2 \cdot 10^{12}$ эВ)¹⁰².

A — средняя амплитуда эффекта, σ — статистическая ошибка амплитуды

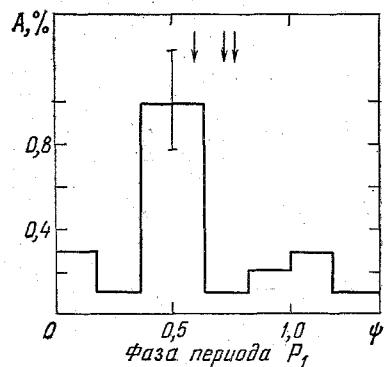


Рис. 10. Зависимость потока периодического компонента от фазы периода P_1 в интервале сверхвысоких энергий⁸⁶.

Стрелки соответствуют максимуму рентгеновского излучения источника

Световая кривая γ -излучения в этих наблюдениях имела только один узкий пик при фазе $\phi = 0,7\text{--}0,8$.

Измерения, проводившиеся на гелиоэнергетической установке в Калифорнии (база BBC Эдвардс, США)²⁷ при энергетическом пороге $5 \cdot 10^{11}$ эВ, также обнаружили на световой кривой периода P_0 только один пик в интервале фаз $\phi = 0,5\text{--}0,7$. Такая же световая кривая была получена и при наблюдениях Дармского университета¹⁰⁹, проводившихся в то же время, но при более высоком энергетическом пороге ($>2 \cdot 10^{12}$ эВ). Было получено указание на модуляцию пика излучения при $\phi = 0,6$ с периодом P_1 .

Переходя к сопоставлению перечисленных выше результатов, можно заметить, что Лебедь X-3 как источник в области сверхвысоких энергий надежно обнаружен на пяти независимых установках. Значения потоков γ -квантов от источника существенно различаются (см. табл. III). Однако, если учсть известные неопределенности в оценке энергетических порогов установок и переменный характер излучения, отмеченные различия получают естественное объяснение. Среди исследователей нет расхождений и в том, что поток γ -излучения Лебедя X-3 изменяется с периодом $P_0 = 4,8$ ч. Однако вид световой кривой, полученной в разных сериях измерений, оказывается различным: согласно данным КрАО и ФИАН на кривой имеется два пика (фазы $\phi = 0,2$ и $\sim 0,7$), но в наблюдениях^{26,27,109} заметен только один пик (на фазе $\phi = 0,5\text{--}0,7$), несколько различающийся по ширине.

Надо сказать, что характер переменности источника делает задачу получения световой кривой периода P_0 отнюдь не простой. В самом деле, данные долговременных измерений КрАО и ФИАН показывают, что Лебедь X-3 время от времени становится источником спорадического излучения, когда поток может быть относительно высоким в любую фазу этого периода.

Распределение таких возрастаний интенсивности по мощности (т. е. по амплитуде и продолжительности) остается неизвестным. Малые по мощности всплески, возможно, достаточно многочисленные (не исключено, что именно такие всплески — транзиенты — наблюдались в 110), не могут быть надежно выделены и должны, следовательно, присутствовать в массиве данных, по которым определяется световая кривая. Тем самым в световую кривую вносятся определенные искажения, ибо распределение наблюдений по фазам периода в данный наблюдательный сезон чаще всего оказывается неравномерным. Дополнительные трудности возникают при учете периода P_1 и зависимости от его фазы световой кривой периода P_0 . Перечисленные трудности (к ним надо еще добавить селекцию из-за регулярного распределения интервалов наблюдения по лунному календарю) могут, думается, служить достаточным объяснением того, что пик близ фазы $\varphi \approx 0,7$, обнаружен во всех наблюдениях (хотя и разной ширины), а пик близ фазы $\varphi \approx 0,2$ — только в наблюдениях КРАО и ФИАН. Вполне возможно, что и в случае сверхвысоких энергий имеет место закономерное изменение фазы φ в зависимости от фазы периода P_1 , о чем говорилось выше¹⁴⁵.

Для понимания механизма генерации γ -излучения очень важны данные, касающиеся его спектра. Здесь также приходится сталкиваться с определенными трудностями. Как уже отмечалось, пороговые энергии регистрации γ -квантов на черенковских детекторах оцениваются с большой неопределенностью (множитель 2, по крайней мере). Все имеющиеся данные нанесены на график рис. 11. Точки соответствуют среднему по периоду P_0 потоку, но не учитывают вклада спорадической составляющей и зависимости потока от фазы периода P_1 . Поэтому наиболее представительными и надежными являются точки, полученные усреднением по достаточно большому временному интервалу — КРАО (9 лет наблюдений) и ФИАН СССР (4 года наблюдений). Показатель интегрального спектра, определенного по двум этим точкам, равен $1,2 \pm 0,3$.

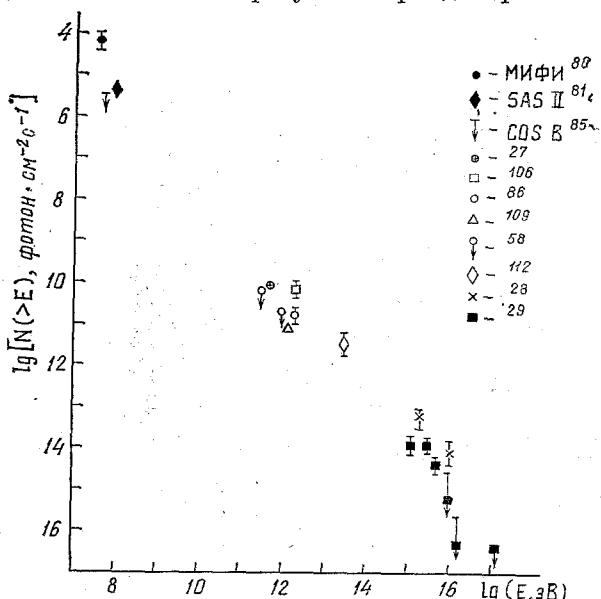


Рис. 11. Интегральный энергетический спектр γ -излучения источника

е) γ -излучение ультравысоких энергий ($>10^{15}$ эВ)

Совсем недавно стали известны результаты наблюдений потоков γ -квантов с энергией $10^{15} - 10^{16}$ эВ от Лебедя Х-3, полученные на установках, регистрирующих заряженные частицы ШАЛ. В этих установках используются счетчики частиц, позволяющие определить разность времени прихода ШАЛ в разные точки с точностью до нескольких наносекунд. Как правило, эти установки обладают достаточно большим числом таких счетчиков, расположенных на значительной площади (квадратные километры), что позволяет по запаздыванию сигналов в детекторах определять направление оси ливня в пространстве.

Убедительный результат получен на установке в Киле, ФРГ²⁸, по данным почти четырехлетних измерений. Направление прихода частиц измерялось с точностью до 1°. Распределение числа событий по направлениям прихода первичных частиц показало, что имеется статистически значимое превышение числа событий в направлении на Лебедь X-3. При этом оказалось, что характеристики части ливней, приходящих с этого направления, близки к характеристикам ливней от γ-квантов. Но наиболее убедительным доказательством связи избыточного потока с источником Лебедь X-3 является обнаружение 4,8-часовой периодичности в появлении ШАЛ. При этом ширина пика в распределении по фазе не превосходит 1/50 периода P_0 . По оценкам авторов пороговая энергия γ-ливней равна $2 \cdot 10^{15}$ эВ. При энергии $2 \cdot 10^{16}$ эВ намечается укручение спектра излучения. Средняя величина потока составляет $I (> 2 \cdot 10^{15} \text{ эВ}) = (7,4 \pm 3,2) \cdot 10^{-14} \text{ фот/см}^2\text{с}$. Используя критерий Пирсона, авторы находят среднее значение периода $P_0 = 0,1996816$ (2) сут. Это значение несколько отличается от величины P_0 , найденной по рентгеновским измерениям и в области γ-излучения сверхвысоких энергий (см. табл. II).

Аналогичный анализ результатов измерения ШАЛ на установке Хавера-Парк, Англия²⁹, также показал наличие избыточного потока в направлении на Лебедь X-3. И в этих измерениях была обнаружена периодичность потока γ-квантов с периодом P_0 . Средняя величина потока составляет $I (> 3 \cdot 10^{15} \text{ эВ}) = (1,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-14} \text{ фот/см}^2\text{с}$. Более определенно, чем в²⁸, виден загиб спектра при энергиях выше 10^{16} эВ. Однако, в отличие от²⁸, значение периода P_0 согласуется с последними рентгеновскими данными¹¹¹. Анализ энергетического спектра γ-излучения Лебедя X-3 в области ультравысоких энергий проведен в¹⁴⁴. Рассматривается поглощение γ-квантов на пути от источника к наблюдателю в результате взаимодействия с фотонами теплового реликтового излучения (γ') с образованием электронно-позитронной пары:



Пороговая энергия реакции (2) составляет $E_{\gamma\text{пор}} = 4 \cdot 10^{14}$ эВ. За порогом сечение реакции вначале резко возрастает, а с энергией $2 \cdot 10^{15}$ эВ начинает убывать приблизительно по закону $E^{-0,25}$. Так как на пути γ-квантов набирается оптическая толщина $\tau \sim 1$, потоки, измеренные в интервале $E_\gamma = 2 \cdot 10^{15} - 10^{16}$ эВ, необходимо исправить для определения истинного спектра источника. Поправочные коэффициенты оказались равными $K = 3$ и $K = 1,8$ соответственно для крайних энергий указанного интервала. Исправленный спектр работы²⁸ уже не представляется единой одностепенной зависимостью, а содержит некоторый избыток (горб) в области энергий $10^{15} - 10^{16}$ эВ. Однако делать из этого какие-либо выводы кажется пока преждевременным в связи с большим разбросом экспериментальных точек в этой области энергий (см. рис. 11 — данные работ^{28, 29} отличаются). С. Стефенс и Р. Верма¹⁴⁶ обратили внимание на то, что спектр мог бы обрезаться при энергиях $> 10^{16}$ эВ уже в самом источнике из-за рождения пар в магнитном поле. Согласно¹⁴⁶ для объяснения имеющихся данных достаточно при $r = 10^{14}$ см иметь напряженность поля 0,7 Гс.

Получены первые указания на 34-дневную вариацию потока в области ультравысоких энергий²⁸. В этом отношении интересна работа¹¹², выполненная на установке по регистрации ШАЛ со сравнительно невысоким угловым разрешением ($\sim 5^\circ$) и низким энергетическим порогом ($3 \cdot 10^{13}$ эВ). Авторы обнаружили избыточный поток γ-квантов от Лебедя X-3 на уровне 3σ, но наибольший интерес представляет анализ поведения световой кривой периода P_0 в зависимости от фаз 34-дневной вариации (период P_1). Оказалось, что если в одном интервале фаз ψ пик приходится на фазу $\phi = 0,6 - 0,8$, то в другом интервале фаз ψ он появляется на $\phi = 0,15 - 0,35$. Вероятно, эта закономерность имеет место во всем γ-диапазоне¹⁴⁵.

Итак, γ -излучение ультравысоких энергий представляет реальный факт: Лебедь Х-3 — первый известный космический источник, от которого регистрируются γ -кванты столь высоких энергий. Важно также и то, что диапазон ультравысоких энергий является весьма весомым в общем излучении источника. Как видно из рис. 11, спектр источника простирается до энергий 10^{16} эВ практически без изменений и, по-видимому, может быть представлен единым степенным законом со средним показателем $\alpha \approx 1.0$. Не все точки при этом ложатся на указанную зависимость, что, скорее всего, объясняется неточным знанием энергетических порогов установок (к сожалению, до сих пор нет метода абсолютной калибровки установок по регистрации ШАЛ). Светимость Лебедя Х-3 при ультравысоких энергиях представляет внушительную величину; даже с учетом обрезания спектра на энергии 10^{16} эВ она составляет $L_\gamma (>2 \cdot 10^{15} \text{ эВ}) = 1.1 \cdot 10^{36} \text{ эрг/с.}$

4. МОДЕЛИ ИСТОЧНИКА

На первом этапе исследований Лебедя Х-3 считалось, что этот объект представляет собой обычную двойную рентгеновскую систему (типа Скорпион X-1 или Циркуль X-1) и является, возможно, поздней стадией эволюции подобных систем¹¹³. Исходя из такого предположения, и строились первые модели источника^{56,114}. В них постулировалось, что период $P_0 = 4.8$ ч является орбитальным, а сам объект представляет собой тесную двойную систему. В частности, в работе¹¹⁴ в качестве источника рентгеновского излучения рассматривается белый карлик, аккрецирующий вещество интенсивного звездного ветра второго компонента системы — красного карлика. Дополнительный источник энергии белого карлика — поверхностные термоядерные реакции, идущие в аккрецируемом веществе. Такая система могла бы явиться аналогом объектов типа U Близнецов, для которых характерно наличие периодических вспышек с амплитудой, достигающей в видимом свете нескольких звездных величин. Рентгеновская световая кривая для периода P_0 получила в этой модели естественное объяснение, так как при орбитальном движении звезд изменяется оптическая толщина газа между рентгеновским источником и наблюдателем. Этот же период должен присутствовать и в инфракрасном излучении ввиду того, что температура газового облака, образуемого ветром, максимальна вблизи источника рентгеновского излучения.

Подобные модели использовались как основа для количественной интерпретации данных радионаблюдений. Главный результат анализа этих данных заключается в том, что радиоизлучение имеет синхротронную природу, а радиовспышки возникают при появлении большого числа релятивистских электронов. Вариации интенсивности радиоизлучения на разных частотах во время радиовспышек могут быть количественно описаны при различных исходных предположениях, хотя большинство авторов использует одну и ту же качественную картину — расширяющееся облако релятивистских электронов, находящихся в плазме с магнитным полем. Простейшее предположение, учитывающее только адиабатическое охлаждение ускоренных электронов^{10,55}, как показали более детальные расчеты¹¹⁶, неприемлемо. Согласие с данными наблюдений значительно лучше, если принимать во внимание тормозные потери электронов в плазме^{117,118} или их синхротронные потери¹¹⁹. Наблюдениям вспышек сентября 1972 г. можно также удовлетворить с хорошей точностью, если учесть нелинейный характер расширения облака (динамическая модель¹²⁰) или то, что вспышки следуют друг за другом достаточно часто (модель сталкивающихся ударных фронтов¹²¹).

Подробно разработанная модель, описывающая важнейшие особенности радиовспышек, была предложена в¹²² в рамках описанного выше общего подхода¹¹⁴. Предполагалось, что релятивистские электроны ускоряются ударной волной, возникающей в результате ядерного взрыва аккрецируемого вещества на поверхность белого карлика. Характер радиовспышки, соглас-

но ¹²², существенно зависит от условий в звездном ветре и параметров взрыва: после достаточно мощного взрыва значительная часть газа «выметается» и ударная волна следующей вспышки распространяется по более разреженной среде. Расчеты, проведенные с учетом потерь энергии электронов на адиабатическое охлаждение, тормозное и синхротронное излучение, позволяют оценить некоторые параметры системы. Так, на расстоянии $r \approx 10^{14}$ см от центра системы плотность плазмы составляет $\approx 10^7$ см⁻³, а напряженность магнитного поля $\approx 0,1$ Гс. Инъекция электронов с энергией $E = 10^8$ эВ происходит на расстоянии $r \approx 10^{11}$ см. Близкие к этим значениям оценки получаются и из анализа радиоизлучения источника в «спокойном» состоянии ¹²³. При степенном спектре ускоренных электронов вида E^{-2} напряженность магнитного поля убывает с расстоянием по закону $H(r) \propto 1/r$, т. е. соответствует геометрии архimedовой спирали.

Следует отметить, что не все факты радионаблюдений получили объяснение в перечисленных выше моделях. Так, остается неясной природа квазипериодических флюктуаций интенсивности радиоизлучения ¹²⁴. Нет объяснения и наличию в радиоизлучении периода $P_1 = 34$ сут ¹⁰⁵.

Возвращаясь к попыткам построить синтетическую, самосогласованную модель источника, надо иметь в виду, что до настоящего времени нет безупречных доказательств того, что период P_0 является орбитальным. В ¹²⁵ предложено рассматривать P_0 как период вращения пульсара, а орбитальный период должен составлять несколько лет. Рентгеновская светимость источника в такой модели обеспечивается акрецией газа, перетекающего от второго компонента — сверхгиганта.

В модели ¹²⁶ период P_0 является орбитальным, акреция на компактный объект идет с нормальной звезды главной последовательности, но предполагается, что система погружена в газовую оболочку, поглощающую и переизлучающую рентгеновское излучение пульсара (модель «кокона»). Оценки показывают, что размер «кокона» составляет $\approx 10^{12}$ см, а плотность газа в нем $\sim 10^{13}$ см⁻³. Такая оболочка не позволяет наблюдать пульсации рентгеновского излучения, обусловленные вращением пульсара (с периодом ~ 1 с). Световая кривая периода P_0 объясняется присутствием тени нормальной звезды на оболочке. Модель «кокона» требует очень высокой рентгеновской светимости пульсара: $L (>25 \text{ КэВ}) = 6 \cdot 10^{38}$ эрг/с, что на два порядка превышает светимости известных рентгеновских пульсаров ⁶⁶. Происхождение «кокона» не рассматривается.

Перечисленные модели сейчас, очевидно, представляют только исторический интерес, ибо основная идея, лежащая в их основе, оказалась неверной: Лебедь X-3 определенно не является типичной двойной рентгеновской системой с акрецией. Такому предположению противоречат следующие надежно установленные факты, не объяснимые ни в одной из описанных моделей:

1. Радиоизлучение источника намного превышает то, что наблюдается у всех двойных рентгеновских объектов. Даже в «спокойном» состоянии отношение радио и рентгеновских потоков Лебедя X-3 на два порядка больше, чем у типичного двойного рентгеновского источника Скорпион X-1.

2. Энергия, выделяемая при радиовспышках Лебедя X-3 только в релятивистских электронах, значительно превосходит энергию типичной вспышки в источниках типа У Близнецлов.

3. Лебедь X-3 является мощным источником γ -излучения от 10^8 эВ до 10^{16} эВ, чего не наблюдается у обычных рентгеновских источников.

Поскольку единственными известными объектами — источниками γ -квантов в Галактике являются молодые пульсары, этот факт служит серьезным аргументом в пользу моделей, где предполагается, что одним из компонентов системы является молодой пульсар. Сама идея о наличии молодого пульсара с возрастом $\approx 10^2$ лет в Лебеде X-3 была впервые высказана в работе ¹²⁷ (см. также ¹²⁸, где было предположено, что период P_0 является периодом прецессии оси быстро вращающегося объекта). Более подробно гипотеза

о присутствии молодого пульсара в системе Лебедь X-3 рассмотрена в ¹²⁹, где период P_0 предполагается орбитальным, а в качестве второго компонента рассмотрен красный карлик. Отсутствие радиоизлучающей оболочки Сверхновой, которая должна наблюдаваться, если пульсар действительно молод (возраст $10^2 - 10^4$ лет), объясняется возможностью образования нейтронной звезды-пульсара в результате безвзрывного коллапса ¹³⁰. Энергия, обеспечивающая высокую рентгеновскую светимость источника ($\sim 10^{38}$ эрг/с), черпается из вращательной энергии пульсара. Радиовспышки связываются со скачками периода вращения пульсара («глitchами»), наблюдаемыми у молодых пульсаров. Газ, окружающий систему и образующий оболочку-кокон, испускается красным карликом, чья атмосфера сильно нагрета релятивистским ветром пульсара. Под действием релятивистского ветра газ ускоряется и выносится за пределы системы, средняя скорость потери массы системы составляет $\sim 10^{-6} M_{\odot}$ год⁻¹. Ветер пульсара, достигнув газа, образует фронт ударной волны с хаотическими магнитными и электрическими полями, на котором и происходит ускорение частиц — электронов и протонов. Гамма-излучение с энергией $\sim 10^8$ эВ возникает в результате синхротронного излучения электронов в магнитных полях $10^2 - 10^3$ Гс, вмороженных в газ, а также при ядерных взаимодействиях ускоренных протонов с атомами газа. Исходя из плотности энергии релятивистского ветра, авторы ¹²⁹ оценили температуру газа и получили величину $T \approx 10^7$ К. Однако инфракрасное излучение источника в этой модели обусловлено в основном нетепловым синхротронным компонентом. Световая кривая для периода P_0 объясняется затмением звездой наиболее яркой области газа. Фазы этого периода в излучении на разных частотах, от инфракрасного до γ -излучения, должны совпадать. Изложенная модель в общих чертах хорошо описывает большую часть наблюдательных данных, включая даже такие детали, как непериодические вариации рентгеновского излучения. Однако авторы совсем не рассматривают диапазон сверхвысоких энергий и даже неясно, как в рамках модели можно объяснить присутствие в спектре источника γ -квантов с энергией $E > 10^{12}$ эВ.

Другие варианты той же модели пульсар — карликовая звезда были рассмотрены в работах ¹³¹⁻¹³⁵. В ¹³¹ предположено, что γ -излучение с $E_{\gamma} \sim 10^8$ эВ обусловлено обратным комптоновским рассеянием электронов, ускоренных пульсаром, на рентгеновских фотонах. Согласно оценкам, инфракрасное излучение должно иметь синхротронную природу. Модуляция γ -излучения периодом P_0 , который предполагается орбитальным, связана с анизотерией этого излучения. В ¹³² обращается внимание на некоторое сходство в широком диапазоне частот спектров излучения Лебедя X-3 и Крабовидной туманности. Эта аналогия позволила обосновать предположение о наличии в Лебеде X-3 пульсара с возрастом $\approx 10^2$ лет. γ -кванты вплоть до сверхвысоких энергий возникают в результате тормозного излучения электронов в газе, окружающем систему. Для оценки плотностей релятивистских электронов, плазмы и магнитного поля в облаке использовались данные радио и инфракрасных наблюдений. Результаты ¹³² должны рассматриваться как сугубо предварительные, так как использовалось грубое предположение о генерации излучения в разных диапазонах частот в одном и том же объеме. Работа ¹³³ обращает внимание на то, что пульсар в Лебеде X-3 может быть молодым в эволюционном, а не хронологическом смысле, если его магнитное поле не превышает $5 \cdot 10^{10}$ Гс. В этом случае нужная высокая светимость системы обеспечивается при периоде вращения пульсара 4 мс и возрасте $\sim 10^5$ лет. Таким образом, разрешается проблема ненаблюдаемой оболочки Сверхновой у Лебедя X-3. Интересно отметить, что пульсар с таким коротким периодом (1,5 мс) был недавно открыт ¹³⁶, причем его возраст составляет $\sim 10^5$ лет. В ¹³⁴ отмечено, что данные о γ -излучении с $E_{\gamma} = 10^8$ эВ могут быть согласованы с результатами радионаблюдений, если предположить, что γ -кванты возникают в процессе комптоновского рассеяния радиоизлучаю-

щих электронов на тепловом рентгеновском излучении с энергией ~ 1 кэВ. В работе ¹³⁵ старая модель «кокона» видоизменена: внутрь оболочки-кокона, объясняющей, как и прежде, рентгеновскую световую кривую, помещен пульсар с периодом вращения 10–30 мс.

Модель, рассмотренная в ¹³⁷, весьма близка по своей основе к модели ¹²⁹. Схематически она представлена на рис. 12. Красный карлик служит источником газа в системе. Вследствие орбитального движения из-за центробежной

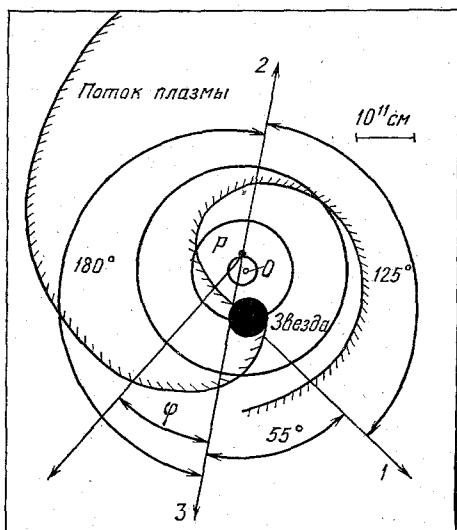


Рис. 12. Схематическое изображение модели источника Лебедь X-3 ¹³⁷.

1 — направление на минимум рентгеновского излучения, 2 — направление на максимум рентгеновского излучения, 3 — направление на максимум γ -излучения с энергией $E_\gamma \geq 10^{12}$ эВ. Р — пульсар, О — центр масс двойной системы, с ϕ — угол между лучом зрения и осью системы

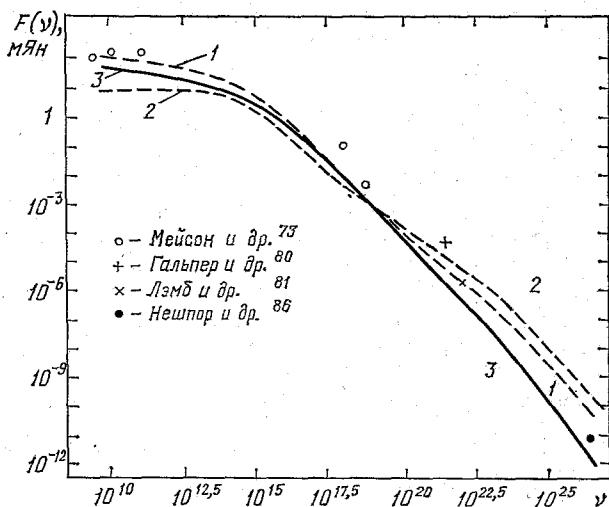


Рис. 13. Сопоставление расчетных спектров излучения источника с данными наблюдений ¹³⁷.

Кривые 1, 2 соответствуют напряженности магнитного поля на поверхности звезды $H = 100$ и 10 Гс, кривая 3 относится к случаю отсутствия потерь на обратное комптоновское рассеяние

силы газ уходит из системы. При этом образуется газовая спираль с вморо- женным в плазму магнитным полем. Частицы, ускоряемые пульсаром, имеют энергетический спектр вида $E^{-2,2}$ в интервале энергий $10^9 - 10^{16}$ эВ. Двигаясь радиально, они попадают на магнитное поле, напряженность которого у поверхности звезды составляет $10 - 100$ Гс. Плотность фотонов синхротронного излучения во всем диапазоне частот настолько велика, что, как показали оценки ¹³⁷, потери энергии на обратное комптоновское рассеяние превалируют над синхротронными для частиц с энергиями вплоть до 10^{14} эВ. Основная отличительная черта этой модели — то, что в ней проведены расчеты как спектра электромагнитного излучения, так и спектра частиц путем решения системы кинетических уравнений для частиц и поля излучения.

Полученный в результате численного решения спектра излучения Лебедя X-3 представлен на рис. 13. Он охватывает все изученные диапазоны и, как видно из рисунка, довольно хорошо согласуется с экспериментальными данными. Превышение измеренных потоков над ожидаемым в области рентгена объясняется тем, что основная часть рентгеновского излучения является тепловым излучением нагретого газа (температуры $10^7 - 10^8$ К). Полная мощность, передаваемая пульсаром ускоренным частицам, равна $2 \cdot 10^{38}$ эрг/с, т. е. близка к аналогичной величине для пульсара в Крабовидной туманности.

В 137 проведены также расчеты световых кривых γ -излучения. Модель хорошо объясняет соотношение фаз периода P_0 между минимумом рентгеновского потока и пиком γ -излучения. Следует, правда, отметить что модель не дает объяснения второму пику ($\phi = 0,6 - 0,8$). В связи с этим уместно заметить, что согласно 28,29 при энергиях $E_\gamma > 10^{15}$ эВ на световой кривой имеется лишь один пик, совпадающий по фазе с первым пиком γ -излучения с $E_\gamma \geq 10^{12}$ эВ ($\phi = 0,2 - 0,3$). Можно предположить, что γ -кванты с $E_\gamma > 10^{15}$ эВ имеют синхротронное происхождение. Что же касается пика на $\phi \sim 0,6$, то он, по-видимому, образуется за счет обратного комптоновского рассеяния.

Еще одна модель источника, опирающаяся на результаты при сверхвысоких энергиях, предложена недавно в 138 . Как и в большинстве предшествующих моделей, период P_0 считается орбитальным. Авторы рассматривают световую кривую, состоящую из двух пиков, разделенных по фазе на $0,4P_0$. Такой сдвиг объясняется затмением источника ускоренных частиц — пульсара вторым компонентом системы. Из возможных механизмов генерации γ -квантов при прохождении пучка заряженных частиц через атмосферу звезды наибольший вклад в регистрируемый поток дадут тормозное излучение электронов и спад π^0 -мезонов. Авторы отмечают, что ускорение частиц на ударной волне (как и в модели 129) возможно в условиях геометрии системы лишь до энергий $\sim 10^{14}$ эВ. Поэтому, если бы были обнаружены γ -кванты более высоких энергий, это послужило бы аргументом против такого варианта ускорения. Но, как следует из предыдущего раздела, γ -кванты с энергиями $E_\gamma = 10^{15} - 10^{16}$ эВ реально присутствуют в излучении Лебедя X-3, что согласно 138 означает ускорение частиц не на ударной волне, распространяющейся от пульсара до звезды-компаньона, а непосредственно в самом пульсаре.

Следует подчеркнуть, что пока нет убедительных доказательств присутствия в Лебеде X-3 молодого пульсара. В частности, поиск коротких (миллисекундных) периодов еще не привел к определенному результату 139 . Основываясь на этом, в некоторых работах предполагается, что компактным объектом в двойной системе Лебедь X-3 может быть черная дыра. Модели 140,141 , разрабатывавшие эту идею, сейчас должны быть оставлены, так как в обоих моделях определенно предсказывается обрезание спектра γ -квантов в области сверхвысоких энергий, чего не наблюдается.

В 115 на основе некоторого сходства световых кривых γ -излучения Лебедя X-3 и рентгеновского излучения объекта SS433 предполагается, что оба источника имеют одинаковую природу и представляют собой двойную систему с черной дырой, масса которой равна $\sim 10 M_{\odot}$. В таком случае в Лебеде X-3 также должны существовать субрелятивистские струи газа, наблюдавшиеся у SS433. Именно в них, согласно 115 , происходит ускорение электронов до экстремально высоких энергий. Далее, электроны высвечиваются на «коконе», окружающем систему (в источнике SS433 — на оболочке Сверхновой), порождая наблюдаемые потоки γ -излучения. Согласно этим представлениям, период $P_1 = 34$ сут должен соответствовать периоду прецессии аккреционного диска, а период $P_0 = 4,8$ ч должен быть орбитальным. Эти соображения выглядели бы более убедительно, если бы было найдено γ -излучение SS433 (недавно получено указание на поток сверхжестких γ -квантов от этого объекта 59). Кроме того, предположение о периоде P_1 , как прецес-

сионном для диска акреции, необходимо согласовать с данными рентгеновских наблюдений.

Подводя итог обзору теоретических моделей источника, можно заметить, что уже само обилие всякого рода идей, предположений и гипотез является свидетельством того, что Лебедь X-3 представляет во многих отношениях загадку. Пока еще не создано модели, в которой были бы синтезированы все наблюдательные данные по спектру излучения источника. Основная причина, вероятно, состоит в том, что в Галактике не найдено бесспорного аналога Лебедя X-3. Поэтому остается неясной его астрофизическая природа: эволюционные предшественники, происхождение и последующее развитие. Объектом, несколько напоминающим Лебедь X-3, является, как указано в⁷⁴, переменный радиоисточник GT0236 + 610, от которого также регистрировались сильные радиосигналы. Знаменательно, что в пределах ошибок он совпадает по положению с дискретным γ -источником CG135 + 1 из каталога COS-B⁸⁹. Наконец, согласно модели¹³⁸, популяция объектов, подобных Лебедю X-3, очень малочисленна — во всей Галактике их должно быть около десяти.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Источник Лебедь X-3 представляет собой уникальный объект. Он резко отличается, в первую очередь по мощности излучения, не только от других известных дискретных источников γ -квантов, но и от типичных рентгеновских источников в двойных системах. Его интенсивное излучение в радио- и γ -диапазонах определенно указывает на важную роль частиц высоких энергий в жизни источника. Это совсем не похоже на обычные рентгеновские источники в тесных двойных системах, все процессы в которых объясняются акрецией на компактный объект — нейтронную звезду или черную дыру. В источнике же Лебедь X-3 главную роль играет ускорительный механизм, сдвигающий спектр взаимодействующих частиц в сторону больших энергий. В связи с этим очень правдоподобным кажется предположение, которое находит все больше сторонников, что в состав Лебедя X-3 входит молодой пульсар. Все особенности поведения, высокая энергетика источника и его уникальность приписываются столь раннему возрасту нейтронной звезды, которая при периоде вращения 1—10 мс (он еще не найден) и магнитным полем на поверхности 10^{12} — 10^{13} Гс работает как эффективный ускоритель заряженных частиц.

Очевидно, для построения достаточно совершенной модели Лебедя X-3 требуются новые наблюдательные данные. В радиодиапазоне по-прежнему остаются актуальными измерения поляризации и ее изменений во времени, в частности, на высоких частотах в спокойном состоянии источника. В инфракрасной области было бы очень важно получить данные о наклоне спектра излучения и выяснить, зависит ли показатель спектра от периода P_0 . Такая информация позволит ответить на вопрос о механизме излучения в этой области спектра. Весьма желательно дополнить и уточнить данные об изменениях спектра (периодических и непериодических) в рентгеновском диапазоне. Эти данные очень важны для решения вопроса о природе периодических вариаций интенсивности (с периодами P_0 и P_1). Особый интерес представляют наблюдения в области жесткого рентгеновского излучения (до 100 кэВ) для выяснения вклада нетеплового излучения. Данные о спектре при этих энергиях (и, конечно, его вариациях) необходимы для «привязки» измерений в рентгеновском и γ -диапазонах. Если справедливо предположение о наличии в источнике молодого пульсара, от него должно наблюдаться аннигиляционное γ -излучение с $E_\gamma = 0,5$ МэВ. Обнаружение аннигиляционной линии 0,5 МэВ было бы крайне важным для выяснения природы источника. В γ -диапазоне при энергиях 10^8 и 10^{12} эВ желательно получить дополнительную информацию об энергетическом спектре и его вариациях с периодами P_0 и P_1 .

Наконец, в области γ -излучения ультравысоких энергий необходимо точно установить, при каких энергиях обрезается спектр источника, и получить точные сведения о его наклоне и вариациях. Как видно, задач для дальнейших исследований Лебедя Х-3, возможно, самого интересного источника в Галактике, остается еще так много, что их вполне хватит для работы следующего поколения телескопов и исследователей.

Московский инженерно-физический
институт
Крымская астрофизическая
обсерватория

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И.— УФН, 1964, т. 84, с. 201.
2. Фридман Г.— Ibidem, 1974, т. 112, с. 517.
3. Гальпер А. М., Кириллов-Угрюмов В. Г., Лучков Б. И.— Ibidem, с. 491.
4. Гальпер А. М., Лучков Б. И., Прилуцкий О. Ф.— Ibidem, 1979, т. 128, с. 313.
5. Giacconi R., Gorenstein P., Gursky H. et al.— Astrophys. J., 1967, v. 148, p. L119.
6. Giacconi R., Kellogg E., Gorenstein P. et al.— Ibid., 1971, v. 165, p. L27.
7. Leong C., Kellogg E., Gursky H. et al.— Ibid., v. 170, p. L67.
8. Forman W., Jones C., Cominsky L. et al.— Astrophys. J. Suppl. Ser., 1978, v. 38, p. 357.
9. Gregory P. C.— Nature, 1972, v. 239, p. 439.
10. Gregory P. C., Kronenberg P. P., Seaquist E. R. et al.— Ibid., 1972, v. 239, p. 440.
11. Hjellming R. M., Balick B.— Nature. Phys. Sci., 1972, v. 239, p. 135.
12. Becklin E. E., Neugebauer G., Hawkins F. J. et al.— Nature, 1973, v. 245, p. 302.
13. Bahcall J. N., Bahcall N. A.— Nature, 1974, v. 247, p. 446.
14. Becklin E. E., Hawkins F. J., Mason K. O. et al.— Astrophys. J., 1974, v. 192, p. L119.
15. Parsonsault D. R., Gursky H., Kellogg E. M.— Nature. Phys. Sci., 1972, v. 239, p. 123.
16. Canizares R. W., McClintock J. E., Clark G. W. et al.— Ibid., 1973, v. 241, p. 28.
17. Leach R. W., Murray S. S., Schreier E. J. et al.— Astrophys. J., 1975, v. 198, p. 184.
18. Гальпер А. М., Кириллов-Угрюмов В. Г., Курочкин В. А. и др.— Письма ЖЭТФ, 1973, т. 18, с. 217.
19. Владимирский Б. М., Степанян А. А., Фомин В. П. и др.— Изв. КАО АН СССР, 1974, т. 51, с. 3.
20. Владимирский Б. М., Гальпер А. М., Кириллов-Угрюмов В. Г. и др.— Письма Астрон. ж., 1975, т. 1, с. 25.
21. Гальпер А. М., Кириллов-Угрюмов В. Г., Курочкин В. А. и др.— Ibidem, 1976, т. 2, с. 524.
22. Molteni D., Rapisarda M. et al.— Astron. and Astrophys., 1980, v. 87, p. 88.
23. Dolan J. F., Crannell C. J., Dennis R. R. et al.— Astrophys. Lett., 1982, v. 22, p. 147.
24. Bonnet-Bidaud J. M., van der Klis M.— Astron. and Astrophys., 1981, v. 101, p. 299.
25. Weekes T. C., Danaher S., Fegan D. F. et al.— Ibid., v. 104, p. L4.
26. Danaher S., Fegan D. J., Porter N. A. et al.— Nature, 1981, v. 289, p. 568.
27. Lamb R. C., Godfrey C. P., Wheaton W. A. et al.— In: Proc. of Internat. Workshop on VHE gamma-ray Astronomy.— Ootacamund, 1982, p. 86.
28. Samorsky M., Stamm W.— Astrophys. J., 1983, v. 263, p. L17.
29. Lloyd-Evans J., Coy R. N., Lambert A. et al.— Nature, 1983, v. 305, p. 784.
30. Braes L. L. E., Miley G. K.— Nature, 1972, v. 237, p. 506.
31. Hjellming R. M., Balick B.— Ibidem, v. 239, p. 443.
32. Seaquist E. R., Gregory P. C., Perley R. A. et al.— Nature, 1974, v. 251, p. 394.
33. Braes L. L. E., Miley G. K., Shane W. W. et al.— Nature. Phys. Sci., 1973, v. 242, p. 66.

34. Gregory P. C., Kronenberg P. P., Seaquist E. R. et al.—*Ibid.*, 1972, v. 239, p. 114.
35. Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И.—УФН, 1965, т. 87, с. 85.
36. Корчак А. А., Сыроватский С. И.—*Астрон. Ж.*, 1961, т. 38, с. 885.
37. Луцков Б. И.—*Космич. исследован.*, 1984, т. 22, с. 809.
38. Chu K. W., Biegling J. H.—*Astrophys. J.*, 1973, v. 179, p. L 21.
39. Weekes T. C., Geary J. C.—*Publ. ASP*, 1981, v. 93, p. 474.
40. Geldzahler B. J., Kellerman K. J., Shaffer D. B.—*Astron. J.*, 1979, v. 84, p. 186.
41. Aller H., Hodge P.—*Nature. Phys. Sci.*, 1973, v. 245, p. 40.
42. Marsh K. A., Purton C. R., Feldman P. A.—*Nature*, 1973, v. 248, p. 319.
43. Daishido T., Kawano N., Kawajiri N. et al.—*Nature*, 1974, v. 251, p. 36.
44. Bohnenstengel H. D., Henning K., Wendker H. J.—*Nature*, 1975, v. 256, p. 294.
45. Woodsworth A. W.—*Astron. and Astrophys.*, 1983, v. 122, p. 322.
46. Branson N. J. A., Martin N. H. M., Pooley C. G. et al.—*Nature. Phys. Sci.*, 1972, v. 239, p. 134.
47. McEllin M.—*Mon. Not. RAS*, 1975, v. 170, p. 1P.
48. Woodsworth A. Ph. D. Thesis.—Queen's University at Kingston, Ontario, 1975.
49. Osawa H.—*Astrophys. J.*, 1976, v. 207, p. 1976.
50. McEllin M.—*Mon. Not. RAS*, 1976, v. 175, p. 5P.
51. Ledden J. E., Hodge P. E., Aller H. D.—*Nature*, 1976, v. 262, p. 669.
52. Доминин С. Л., Ефанов В. А., Моисеев И. Г. и др.—Изв. КАО АН СССР, 1980, т. 62, с. 103.
53. Steshenko N. V., Efanova V. A., Moiseev I. G.—IAUC, 1980, p. 3522.
54. Feldman P. A., MacLeod J. M., Andrew B. H. et al.—*Ibidem*, 1982, p. 3731.
55. Peterson F. W.—*Nature*, 1973, v. 242, p. 173.
56. Pringle J. E.—*Nature*, 1974, v. 247, p. 21.
57. Westphal J. A., Kristian J., Huchra J. P. et al.—*Nature. Phys. Sci.*, 1972, v. 239, p. 134.
58. Weekes T. C., Helmken H. F.—In: Proc. of 12th ESLAB Symposium.—Frascati, 1977, p. 39.
59. Becker R. H., Robinson-Saba J. L., Boldt E. A. et al.—*Astrophys. J.*, 1978, v. 224, p. L113.
60. Weekes T. C., Geary J. C.—*Publ. ASP*, 1982, v. 94, p. 708.
61. Savage B. D., Panek R. J.—*Astrophys. J.*, 1974, v. 191, p. 659.
62. Kanbach G.—In: Proc. of 16th ICRC.—Kyoto, 1979, v. 14, p. 105.
63. Buella G., Buccieri R., Burger J. et al.—In: Proc. of 9th ESLAB Symposium.—1974, p. 353.
64. Parsignault D. R., Schreier E., Grindlay J. et al.—*Astrophys. J.*, 1976, v. 209, p. L73.
65. Elsner R. F., Ghosh P., Darbro W. et al.—*Ibid.*, 1980, v. 239, p. 335.
66. Гурский Г., ван ден Хевел Э.—УФН, 1976, т. 118, с. 673.
67. Davison P. J. N.—In: Proc. of IAU Symposium.—Grenobl, 1976.
68. Ulmer M. P., Baity W. A., Wheaton W. A. et al.—*Astrophys. J.*, 1974, v. 192, p. 691.
69. Pietsch W., Kendziorra E., Staubert R. et al.—*Ibid.*, 1976, v. 203, p. L67.
70. Reppin C., Pietsch W., Trümper J. et al.—*Ibid.*, 1979, v. 234, p. 329.
71. Serlemitsos P. J., Boldt E. A., Holt S. S. et al.—*Ibid.*, 1975, v. 201, p. L9.
72. Meegan C. A., Fishman G. J. et al.—*Ibid.*, 1979, v. 234, p. L123.
73. Mason K. O., Becklin E. E. et al.—*Ibid.*, 1975, v. 207, p. 78.
74. Gregory P. C.—*Nature*, 1978, v. 272, p. 704.
75. Duthie G., Cobb R., Stewart J.—*Phys. Rev. Lett.*, 0000, v. 17, p. 263.
76. Valdez J. V., Waddington C. J.—*Astrophys. J.*, 1969, v. 156, p. L85.
77. Niel M., Vedrenne G., Buique R.—*Ibid.*, 1972, v. 171, p. 529.
78. Browning R., Ramsden D., Wright P. J.—*Nature. Phys. Sci.*, 1972, v. 235, p. 128.
79. Гальпер А. М., Курочкин А. В., Лейков Н. Г. и др.—ПТЭ, 1974, № 1, с. 50.
80. Гальпер А. М., Кириллов-Угрюмов В. Г., Курочкин А. В. и др.—Письма ЖЭТФ, 1977, т. 26, с. 381.
81. Lamb R. C., Fichtel C. F., Hartman R. C. et al.—*Astrophys. J.*, 1977, v. 212, p. L63.
82. Schonfelder V., Lichten G.—*Ibidem*, 1974, v. 192, p. L1.
83. Campbell M., Alexander J., Ball S. E. et al.—*Ibidem*, 1975, v. 196, p. 593.

84. McKechnie G. F., Mount K. E., Ramsden D.—Ibidem, 1976, v. 207, p. L151.
85. Swanenburg B. N., Bennett K., Bignami G. F. et al.—Ibidem, 1981, v. 243, p. L69.
86. Нешпор Ю. И., Владимирский Б. М., Зыскин Ю. Л. и др.—Изв. АН СССР, Сер. физ., 1982, т. 46, с. 1665.
87. Озерной Л. М., Усов В. В.—Астрон. ж., 1977, т. 54, с. 753.
88. Ögelman H.—In: Goddard Space Flight Center X-662, 76-154.—1976, p. 118.
89. Bignami G. F., Hermse W.—Ann. Rev. Astron. and Astrophys., 1983, v. 21, p. 67.
90. Harding A., Stecker F.—Nature, 1981, v. 290, p. 316.
91. Paul J. A.—In: Proc. of 17th ICRC.—Paris, 1981, v. 12, p. 79.
92. Galbraith W., Jelley J. V.—Nature, 1953, v. 171, p. 349.
93. Galbraith W., Jelley J. V.—J. Atmospher. and Terr. Phys., 1955, v. 6, p. 304.
94. Чудаков А. Е., Дадыкин В. Л., Зацепин В. И. и др.—Тр. ФИАН СССР, 1964, т. 26, с. 118.
95. Vladimirsky B. M., Stepanian A. A., Fomin V. P.—In: Proc. of 13th ICRC.—Denver, 1973, v. 1, p. 456.
96. Степаниан А. А., Владимирский Б. М., Нешпор Ю. И. и др.—Изв. АН СССР, Сер. физ., 1975, т. 39, с. 417.
97. Владимирский Б. М., Нешпор Ю. И., Степаниан А. А. и др.—Ibidem, 1978, т. 58, с. 44.
98. Степаниан А. А., Владимирский Б. М., Нешпор Ю. И. и др.—Ibidem, 1975, т. 53, с. 29.
99. Stepanian A. A., Fomin V. P., Neshpor Yu. I. et al.—Astrophys. and Space Sci., 1975, v. 38, p. 267.
100. Neshpor Yu. I., Stepanian A. A., Fomin V. P. et al.—Ibid., 1979, v. 61, p. 349.
101. Neshpor Yu. I., Zyskin Yu. L., Mukhanov J. B. et al.—Phil. Trans. Roy. Soc., 1981, v. 304, p. 633.
102. Нешпор Ю. И., Владимирский Б. М., Зыскин Ю. Л. и др.—Изв. КАО АН СССР, 1980, т. 61, с. 61.
103. Fomin V. P., Владимирский Б. М., Нешпор Ю. И. и др.—Ibidem, 1975, т. 53, с. 59.
104. Fomin V. P., Neshpor Yu. I., Stepanian A. A. et al.—In: Proc. 17th ICRC.—Paris, 1981, v. 1, p. 28.
105. Нешпор Ю. И. Изв. КАО АН СССР, 1983, т. 68, с. 118.
106. Муканов Дж. Б.—Ibidem, 1981, т. 63, с. 154.
107. Муканов Дж. Б. Автореферат диссертации.—ФИАН СССР, 1982.
108. Dapaher S., Fegan D. J., Porter N. A. et al.—Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. A, 1981, v. 304, p. 637.
109. Gibson A. I., Harrison A. B., Kirkman I. W. et al.—In: Proc. Intern. Workshop on VHE gamma-ray Astron.—Ootacamund, 1982, p. 86.
110. Weekes T. C.—Ibidem, p. 270.
111. Van der Klis M., Bonnet-Bidaud J. M.—Astron. and Astrophys., 1981, v. 95, p. L5.
112. Morello C., Navarra G., Vernetto S.—In: Proc. of 18th ICRC.—Bangalore, 1983,—v. 1, p. 427.
113. Van der Heuvel E. P. J., De Loore C.—Astron. and Astrophys., 1973, v. 25, p. 387.
114. Davidsen A., Ostriker J. P.—Astrophys. J., 1974, v. 189, p. 334.
115. Grindlay J. E.—Цит. в²⁷ сб., p. 178.
116. Gregory P. C., Seaquist E. R.—Astrophys. J., 1974, v. 194, p. 715.
117. Aller H. D., Dent W. A.—Nature. Phys. Sci., 1972, v. 239, p. 124.
118. Marsh K. A., Purton C. R., Feldman P. A.—Astrophys. J., 1974, v. 192, p. 697.
119. Marcher A. P., Brown R. L.—Ibid., 1975, v. 200, p. 719.
120. Woodworth A. W., Huges V. A.—Ibid., 1976, v. 200, p. 863.
121. Icke V.—Nature. Phys. Sci., 1973, v. 244, p. 132.
122. Seaquist E. R.—Astrophys. J., 1976, v. 207, p. 88.
123. Seaquist E. R., Gregory P. C.—Astrophys. Lett., 1977, v. 18, p. 65.
124. Hellming R. M., Brown R. L., Blanckenship L. C.—Astrophys. J., 1974, v. 194, p. L43.
125. Сюняев Р. А.—Письма Астрон. ж., 1976, т. 2, с. 334.
126. Millgrom M.—Astron. and Astrophys., 1976, v. 51, p. 215.
127. Basko M. M., Sunyaev R. A., Titarchuk L. G.—Ibidem, 1974, v. 31, p. 249.
128. Treves A.—Nature Phys. Sci., 1973, v. 242, p. 124.
129. Bignami G. P., Maraschi L., Treves A.—Astron. and Astrophys., 1977, v. 55, p. 155.

130. Canal R., Schatzman E.—Ibidem, 1976, v. 46, p. 229.
131. Fabian A. C., Blandford R. D., Hatchett S. P.—Nature, 1977, v. 266, p. 512.
132. Владимирский Б. М.—Изв. КАО АН СССР, 1979, т. 60, с. 84.
133. Цыган А. И.—Письма Астрон. ж., 1977, т. 3, с. 300.
134. Арагао К. М. В.—Mon. Not. RAS, 1977, v. 179, p. 763.
135. Milgrom M., Pines D.—Astrophys. J., 1978, v. 220, p. 227.
136. Backer D., Kulkarni S., Heiles C. et al.—Nature, 1982, v. 300, p. 615.
137. Stepanian A. A.—Astrophys. and Space Sci., 1982, v. 84, p. 347.
138. Vestrand T., Eichler D.—Astrophys. J., 1982, v. 261, p. 251.
139. Fegan D. J., Porter N. A., Weekes T. C.—Цит. в ²⁷ сб., п. 267.
140. Shields G. A., Wheeler J. C.—Astrophys. Lett., 1976, v. 17, p. 69.
141. Meszaros P., Meyer F., Pringle J. E.—Nature, 1977, v. 268, p. 420.
142. Dickey J. M.—Astrophys. J., 1983, v. 273, p. L71.
143. Geldzahler B. J., Johnston K. J., Spencer J. H. et al.—Ibidem, p. L65.
144. Gould R. J.—Ibidem, v. 274, p. L23.
145. Гальпер А. М., Лучков Б. И.—Письма Астрон. ж., 1984, т. 10, с. 358.
146. Stephens S. A., Verma R. P.—Nature, 1984, v. 308, p. 828.