

УДК 524.7

Гамма-излучение сверхвысокой энергии от пульсара Геминга по данным наблюдений Крымской обсерватории

Ю.И. Нешпор

Крымская астрофизическая обсерватория, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 5 мая 2003 г.

Аннотация. В НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” проведены наблюдения объекта Геминга с помощью наземного гамма-телескопа ГТ-48 в 1996 – 1997 гг. Анализ данных наблюдений дает основание утверждать, что этот объект является источником гамма-квантов сверхвысоких энергий. Анализ распределения гамма-квантов по времени, методом наложения эпох, показал наличие периодической составляющей в гамма-излучении с периодом 0.237 с.

Подтверждаются полученные ранее на спутниках результаты о 59-секундном периоде и его производной по времени. По нашим данным значение периода в 1997 году было равно 61.94 секунды. Статистическая значимость этого результата равна 0.9995. Пульсар Геминга не выделяется среди гамма-пульсаров мощностью излучения в гамма-диапазоне высоких энергий.

ULTRAHIGH-ENERGY GAMMA-RAYS EMISSION FROM THE GEMINGA PULSAR IN THE CRIMEAN ASTROPHYSICAL OBSERVATORY, *by Yu.I. Neshpor*. In 1996 – 1997, the Geminga pulsar was observed at the Crimean Astrophysical Observatory with a ground-based gamma-ray telescope. Analysis of the observational data suggests that this object is a source of ultrahigh-energy gamma-rays. Analysis of the temporal distribution of gamma-ray photons by an epoch-folding technique reveals a periodicity in the gamma-ray emission with a period of 0.237 s. The 59-s period and its time derivative previously inferred from satellite data have been confirmed. According to our data, the period was 61.94 s. in 1997. The statistical significance of result is 0.9995. Pulsar Geminga do not stand out against other gamma-pulsars by gamma flux of high energy.

Ключевые слова: пульсары, наземная гамма-астрономия, гамма-кванты

1 Введение

Объект Геминга, как источник гамма-квантов высоких энергий, впервые был обнаружен на спутнике SAS-2 около тридцати лет тому назад (Книффен и др., 1975), а затем, спустя два года, и на спутнике COS-B (Масноу и др., 1977). С помощью аппаратуры, установленной на рентгеновском спутнике ЭЙНШТЕЙН, удалось отождествить Гемингу со слабым рентгеновским источником (Биньями и др., 1983). Благодаря этому Геминга была обнаружена и в оптическом диапазоне (Биньями и др., 1987). Это один из самых загадочных астрофизических объектов. Прежде всего, он интересен тем, что поток энергии от него в гамма-диапазоне больше 50 МэВ, в тысячу раз больше, чем в рентгеновском, и в 200 тысяч раз больше, чем в оптическом. В данных наблюдений спутника SAS-2 1972 – 1973 гг. в области энергий 35 МэВ была обнаружена периодическая составляющая

с периодом 59 с (Томпсон и др., 1977). По данным ROSAT в рентгеновском излучении источника Геминга были найдены пульсации с периодом 0.237 с (Галперн и Холт, 1992).

В НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” (КрАО) наблюдения гамма-источника Геминга в области сверхвысоких энергий на гамма-телескопе ГТ-48 были проведены в 1996 и в 1997 гг. Результаты анализа данных наблюдений представлены ниже.

2 Анализ данных наблюдений

Наблюдения объекта Геминга (координаты на 1996 год: $\alpha = 6^h 33^m 37^s$ и $\delta = 17^\circ 46' 25''$) проводились на гамма-телескопе ГТ – 48 (Владимирский и др., 1994; Нешпор и др., 2003), который состоит из двух отдельных телескопов (секций), разнесенных на 20 метров друг от друга. В 1996 году было проведено 5 сеансов, в 1997 году 8 сеансов длительностью 35 мин каждый; общая продолжительность наблюдений источника составила в 1996 г. – 175 мин, а в 1998 г. – 280 мин.

Полученные данные подвергались первичной обработке, необходимой для проведения корректных вычислений первых и вторых моментов распределения яркости света, из которых находились параметры черенковской вспышки (Владимирский и др., 1994, Нешпор и др., 2003). Результаты первичной обработки данных представлены в таблице 1.

Для определения возможного потока гамма-квантов необходимо произвести их отбор путем исключения вспышек, вызванных заряженной компонентой космических лучей.

Параметры вспышки (события), зарегистрированной одновременно на каждой секции, определялись независимо и, следовательно, имели два значения, отмеченных для северной секции цифрой 1 и для южной – цифрой 2. Для уменьшения фона вспышек, вызванных заряженной компонентой космических лучей, мы применили ряд критериев отбора с использованием параметров черенковских вспышек.

При отборе в первую очередь рассматривалась амплитуда вспышки V , которая пропорциональна общей энергии зарегистрированного излучения (интегральный поток света от вспышки). Вспышки с амплитудой $V(1) < 100$ единиц дискрета (500 фотонов) преобразователя аналог-код или $V(2) < 100$ единиц дискрета исключались из дальнейшего рассмотрения, так как параметры этих вспышек определяются с большой ошибкой.

В качестве параметров отбора использовались эффективная длина A и ширина B изображения вспышки. События исключались из дальнейшего рассмотрения, если выполнялось хотя бы одно из условий: $A(1) > 0^\circ 30$; $A(2) > 0^\circ 32$; $B(1) > 0^\circ 17$; $B(2) > 0^\circ 17$.

Как уже отмечалось выше, нами регистрировалось УФ-излучение вспышек. Известно, что электроны от р-ливней данной энергии понижают в среднем на заметно большие глубины в атмосферу Земли, чем от гамма-ливней той же энергии. Это приводит к тому, что черенковские вспышки от р-ливней имеют значительно большие потоки излучения в диапазоне длин волн 200 – 300 нм (ультрафиолетовый диапазон), чем черенковские вспышки от гамма-ливней (Степанян и др., 1983). Отношение амплитуды вспышки в этой области спектра U к суммарной амплитуде в видимой области спектра V будем называть для простоты параметром UV . Этот параметр впервые был успешно применен нами при анализе данных наблюдений Крабовидной туманности (Калекин и др., 1995), а затем и других объектов.

Отбор с использованием параметра UV в среднем по всем годам наблюдений привел к увеличению достоверности результатов до $Q=4.4$ стандартных отклонений. Параметры A , B , V и UV не зависят от положения вспышки относительно источника и называются координатно-независимыми.

Данные, полученные в результате отбора с использованием указанных выше параметров, представлены в таблице 1.

Таким образом, можно считать, что данные наблюдений объекта Геминга по координатнонезависимым параметрам вспышек указывают на наличие потока гамма-квантов сверхвысоких энергий от этого объекта. Дополнительное подтверждение этому дает анализ периодического характера гамма-излучения сверхвысокой энергии.

Таблица 1. Количество зарегистрированных и отобранных событий

Методика отбора	Число событий на источнике N_s	Число событий на фоне N_b	Разность $N_s - N_b$	Q	Год
Без отбора	3867	3826	41	0.43	1996
Отбор по коорд.незав	176	103	73	4.37	
Без отбора	5725	5690	35	0.33	1997
Отбор по коорд.незав	109	86	23	1.65	

3 Пульсирующее гамма-излучение

Как уже говорилось во введении, по данным ROSAT в рентгеновском излучении источника Геминга были найдены пульсации с периодом 0.237 с (Галперн и Холт, 1982). Данные наблюдений EGRET (Бертш и др., 1992), COS-B (Биньями, Каравео, 1992; Гермсен, 1992), SAS-2 (Маттокс и др., 1998) подтвердили наличие этой периодической составляющей. По данным телескопа "Гамма-1" интегральный поток пульсирующего излучения в интервале 300 – 5000 МэВ равен $(1.1 \pm 0.3) \cdot 10^{-6} \cdot \text{кв. см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (Акимов и др., 1993). Наземные наблюдения Геминги 1983 года (Боуден и др., 1993) и 1984 – 1985 гг. (Вишванат и др., 1993), проводимые методом регистрации черенковских вспышек в атмосфере, также выявили пульсирующую составляющую в гамма-излучении сверхвысокой энергии с периодом 0.237 с. Однако, необходимо отметить, что сотрудники обсерватории Уиппла при наблюдениях 1989 – 1991 гг. не обнаружили гамма-излучения сверхвысокой энергии от Геминги (Акерлоф и др., 1993). В течение длительного времени не удавалось обнаружить и пульсации излучения в радиодиапазоне. Радиопульсар в Геминге был обнаружен на Пушчинской радиоастрономической обсерватории Кузьминым и Лосовским (1997), в результате радионаблюдений, которые были начаты в 1992 после сообщения об открытии в Геминге рентгеновского и гамма-пульсара и продолжались в 1993, 1995 и 1996 гг. Затем наличие радиопульсара в Геминге подтвердили Шитов и Пугачев (1997), Малофеев и Малов (1997).

В работе Маттокса и др. (1998) проведен анализ многолетних данных (24.2 года) гамма-излучения высокой энергии, полученных на спутниках SAS-2, COS-B, EGRET и с высокой точностью определены период и производная периода пульсара Геминги.

В данной работе не ставится задача поиска периода, а лишь проверяется гипотеза о наличии периодической составляющей, исходя из значения периода и его производной, полученных с высокой точностью по многолетним данным, опубликованных Шитовым и Пугачевым (1997), Маттоксом и др. (1998). Маттокс и др. (1998) использовали данные SAS-2, COS-B и EGRET и получили следующие значения периода и его производной на эпоху $t = 2446600JD$ (18 июня 1986 г.): $T = 0.2370957461 \text{ с}$, $\dot{T} = 1.097401187 \cdot 10^{-13} \text{ с/с}$. В работе Шитова и Пугачева (1997) значение периода получено по данным радионаблюдений Геминги в период с 1992 по 1996 гг.: $T = 0.23709745295(12) \text{ с}$, $\dot{T} = 10.9765(15) \cdot 10^{-13} \text{ с/с}$ на эпоху $JD = 2448400$. Хотя ошибка значения периода по радиоданным больше, период этих наблюдений ближе к нашему (2450401JD, 13 ноября 1996 года).

Используя приведенные результаты, были рассчитаны значения периода и его производной на время наших наблюдений. Для 13 ноября 1996 года по данным Маттокса и др. (1998): $T = 0.2370993496 \text{ с}$, $\dot{T} = 1.09715948 \cdot 10^{-14} \text{ с/с}$ и по данным Шитова и Пугачева (1997): $T = 0.2370993506 \text{ с}$, $\dot{T} = 1.09765 \cdot 10^{-14} \text{ с/с}$. Для 1997 года (1 ноября) по данным Маттокса и др. (1998) получены: $T = 0.2370996833 \text{ с}$, $\dot{T} = 1.09713706 \cdot 10^{-14} \text{ с/с}$ и по данным Шитова и Пугачева (1997): $T = 0.2370996845 \text{ с}$, производная – та же. Анализ данных наблюдений на периодичность проводился в узком интервале частот в пределах ± 5 шагов в независимости от расчетных значений периода. Для наших данных величина шага независимости равна $5 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ для данных 1996 года и $4 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ – для 1997 года. Анализ проводился методом наложения эпох для черенковских вспышек (событий),

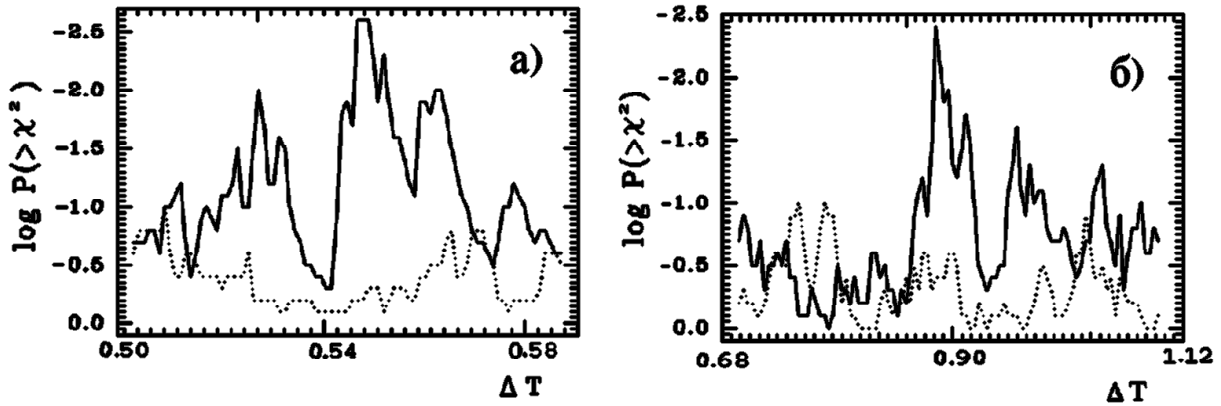


Рис. 1. 1а) Фрагмент периодограммы по данным 1996 года. По оси ординат отложено значение логарифма величины статистической вероятности случайного отклонения ($> \chi^2$), по оси абсцисс отложена величина $\Delta T = (T - 0.237099300) \cdot 10^7$, где T – период в секундах. Сплошная кривая – для данных наблюдений источника, точками обозначена кривая для данных наблюдений фона. 1б) Фрагмент периодограммы по данным 1997 года (обозначения те же, что и на рис. 1а), $\Delta T = (T - 0.237099600) \cdot 10^7$

отобранных по координатно-независимым параметрам из данных наблюдений источника (176 событий для 1996 года и 109 для 1997 года). Для контроля проводился анализ событий, отобранных по координатно-независимым параметрам из наблюдений фона (103 события для 1996 года и 86 для 1997 года). Для каждого события по заданному периоду и его производной определялась фаза. Значение периода бралось на момент начала наблюдений. Изменение производной периода за время наблюдения (менее месяца) не принималось в расчет из-за малости величины. Весь период разбивался на двадцать фазовых интервалов, и строилась фазовая гистограмма (световая кривая) числа событий. Световые кривые строились для каждого пробного периода и анализировались $P(\chi^2)$ – тестом. Для каждого значения χ^2 находилась величина вероятности $P(\chi^2)$ случайного распределения фазовой гистограммы.

Полученные таким образом периодограммы анализировались, и их фрагменты представлены на рис. 1а. по данным 1996 года и на рис. 1б по данным 1997 года. На рис. 1а,б по оси абсцисс отложено значение пробного периода, а по оси ординат значение логарифма величины вероятности $P(> \chi^2)$. Сплошная кривая – по данным наблюдений источника, пунктирная кривая – по данным наблюдений фона.

На периодограммах, полученных по данным наблюдений фона, величина $\log P(> \chi^2) < 1$ (по абсолютной величине). Этот факт, а также характер периодограмм, построенных по данным наблюдений источника, позволяет полагать наличие периодической составляющей в гамма-излучении сверхвысокой энергии с периодом $T = 0.237099354(5)$ с для 1996 года и с периодом $T = 0.237099688(4)$ с для 1997 года. В скобках указано значение шага независимости. Это значение считаем величиной ошибки, с которой определялась величина периода.

Вероятности случайного распределения событий по фазам составляют $P = 2.3 \cdot 10^{-3}$ для 1996 года и $P = 3.4 \cdot 10^{-3}$ для 1997 года. Здесь важно заметить, что полученные Малафеевым и Маловым (1997) значения периода на эпоху (JD = 2450434.4), близкую к нашей, дают с учетом производной величину $P = 0.237099351$ с, что очень хорошо совпадает с полученной нами величиной периода на JD = 2450401. Интересно рассмотреть фазовые гистограммы (световые кривые) для этих двух периодов, которые представлены на рис. 2. Отметим наличие в световых кривых двух пиков (указаны стрелками), которые разнесены на $\Delta\varphi = 0.40 - 0.45$. Сфазировать световые кривые 1996 и 1997 гг. не позволяет неопределенность (величина ошибки) периода. Световая кривая, представленная в работе (Маттокс и др., 1998) также имеет два пика, отстоящих друг от друга на $\Delta\varphi = 0.48$.

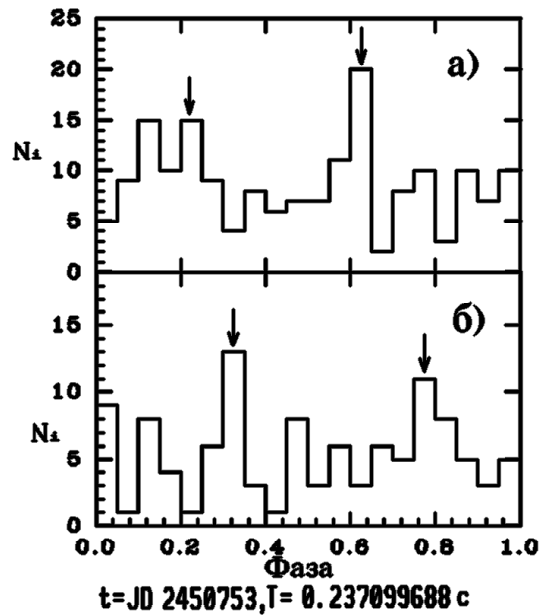


Рис. 2. Фазовые гистограммы: а) для $T = 0.237099354$ с (1996 г.), б) для $T = 0.237099688$ с (1997 г.)

4 “59-секундный” период в гамма-излучении

Как уже говорилось выше, пульсации с периодом 59 секунд впервые были обнаружены в данных наблюдений спутника SAS-2 1972 – 1973 гг. в области энергий 35 МэВ (Томпсон и др., 1977). Впоследствии, в период с 1972 г. по 1983 г., переменность потока от Геминги с этим периодом была зафиксирована и в других энергетических диапазонах (Бигнами и др., 1984) вплоть до сверхвысоких энергий (Зыскин, Муканов, 1983).

Спустя два года на спутнике COS-B в излучении гамма-квантов высокой энергии был обнаружен периодический характер излучения, однако, длительность периода оказалась на 0.2 с больше (Масноу и др., 1977). Затем в 1979 и в 1981 годах на спутнике “Эйнштейн”, и в 1983 году на спутнике “Экзосат” были зафиксированы периодические колебания потока рентгеновского излучения. Длительность периода непрерывно возрастала и к 1983 году уже была более 60 с. Наличие переменного, с периодом в 59 с, потока гамма-квантов сверхвысоких энергий по данным черенковских детекторов впервые отмечалось в работе Зыскина и Муканова (1983), по данным наблюдений 1979 и 1981 годов, а затем в данных наблюдений 1983 года (Зыскин, 1988). Анализ данных наблюдений гамма-квантов сверхвысоких энергий, проведенных в период с декабря 1984 года по февраль 1985 года индийской группой исследователей (Каул и др., 1985), также показал наличие периодической составляющей. Длительность периода равнялась 60.25 с. Более поздние наблюдения Геминги в обсерваториях Уиппла (Акерлоф и др., 1993) и HEGRA (Агаронян и др., 1999) не дали положительного результата. Возможно, это связано с переменностью источника. Наличие периодической составляющей (со значением периода 59 с) в излучении гамма-квантов с энергией ~ 1 МэВ было подтверждено, согласно (Биньями и др., 1984), результатами обработки данных спутника HEAO 3. Этот результат, однако, был подвергнут сомнению в работе Букчери и др., (1985). Тем не менее, нам кажется, что представляет несомненный интерес произвести анализ результатов наблюдений Геминги проведенных в 1996 и 1997 годах в Крымской обсерватории, с целью обнаружения пульсирующей составляющей с периодом 59 с в гамма-излучении сверхвысокой энергии. Чтобы ограничить область значений пробных периодов мы провели экстраполяцию на 1996 и 1997 годы данных по рентгеновским измерениям, проведенным на спутнике “Эйнштейн” в 1979 и 1981 годах и спутнике EXOSAT в 1983 году (Биньями и др., 1984). Линейная аппроксимация методом наименьших квадратов дала

следующее выражение для значения периода:

$$T(t) = (59.4863 \pm 0.0599) + (0.000401314 \pm 0.00003868) \cdot t,$$

где $t = t(i) - t(0)$, $t(0)$ – среднее значение времени регистрации на рентгеновских спутниках, а $t(i)$ – текущее время. Время t выражено в юлианских днях, а период $T(t)$ – в секундах. С учетом ошибок интервал ожидаемых значений периодов в 1996 году равен (61.698 – 62.302)с и в 1997 году (61.826 – 62.457)с. В этих интервалах периодов и проводился анализ данных наших наблюдений. При этом учитывалась производная по времени, которая определялась из выражения:

$$dT/dt = (T(t) - T(0))/(t(i) - t(0)).$$

Анализ проводился методом наложения эпох для отобранных гамма-подобных событий: в 1996 году 176 на источнике и 103 – на фоне, а в 1997 году – 109 на источнике и 86 – на фоне. Для каждого события по заданному периоду и соответствующей производной периода по времени определялась фаза. Значение пробного периода для данных наших измерений изменялось с величиной шага независимости (0.00078 с – в данных 1996 года и 0.00056 с – в данных 1997 года). Весь период разбивался на 11 фазовых интервалов, и строилось распределение событий по фазе (световая кривая). На рис. 3а показан представляющий для нас интерес фрагмент зависимости величины критерия Пирсона от значения пробного периода для данных 1996 года, а на рис. 3б – для данных 1997 года.

Максимальное значение χ^2 по данным 1996 года получено при значении периода равном 61.80921 (78) с для JD=2450401, а по данным 1997 года – 61.94066(54) с для JD = 2450753. В скобках указано значение шага независимости (две последние цифры). На рис. 3 приведены значения χ^2_{ν} для данных, полученных при наблюдении фона. Видно, что в данных фона значения χ^2_{ν} не имеют сколько-нибудь заметной особенности. Вероятности случайного распределения на источнике соответственно равны $3.3 \cdot 10^{-6}$ и $7.5 \cdot 10^{-6}$. С учетом числа независимых испытаний эти вероятности равны $2.5 \cdot 10^{-3}$ и $8.4 \cdot 10^{-3}$. Значения периодов при максимальных χ^2 получаются практически при одном и том же значении производной по времени ($4.3222 \cdot 10^{-9}$ с/с), что позволяет нам объединить световые кривые для 1996 и 1997 годов после небольшой, в пределах шага независимости, поправки в значениях периодов по годам. В итоге мы получаем уточненные значения периодов: 61.80922(11)с – для 1996 года и 61.94067(11)с – для 1997 года. Величина производной по времени, как мы уже отмечали, остается прежней. На рис. 4 представлена световая кривая потока гамма-квантов по объединенным данным 1996 и 1997 годов.

Вероятность случайного распределения по фазе с учетом числа испытаний равна $4.5 \cdot 10^{-4}$. Величина потока периодической составляющей в пике световой кривой равна $(9 \pm 3) \cdot 10^{-11}$ квантов $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Ранее (Нешпор и др., 2001) был определен средний поток гамма-квантов с энергией > 1 ТэВ: $(2, 4 \pm 0.9) \cdot 10^{-11}$ квантов $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Получается, что в пике световой кривой выделяется 1/3 всего потока.

Таким образом, данные наблюдений пульсара Геминга в диапазоне гамма-квантов сверхвысоких энергий (> 1 ТэВ)(СВЭ) позволили определить с высокой точностью значение “59-секундного” периода и его производной по времени. На рис. 5 представлены опубликованные в литературе данные о значении “59-секундного” периода пульсара Геминга и проведена наклонная прямая найденных нами значений периодов с учетом производной ($4.3222 \cdot 10^{-9}$ с/с). Видно, что подавляющая часть данных находится близко от этой прямой.

5 Геминга и другие гамма-пульсары

В литературе опубликованы данные о мощности излучения Геминга – L (эрг/с) в различных диапазонах электромагнитного излучения в предположении их изотропности (см. таблицу 2). В таблице 2 для сравнения приведены данные о мощности излучения Краба.

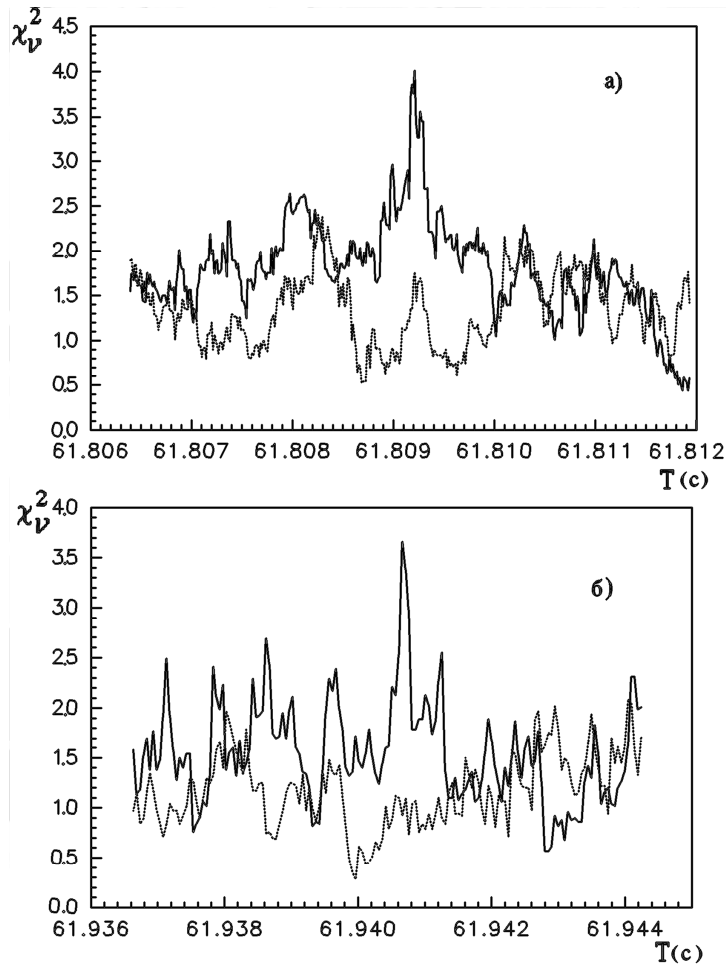


Рис. 3. Фрагменты зависимости χ^2_ν от величины периода для $\nu = 10$. Сплошная кривая – для данных наблюдений источника, точки для данных наблюдений фона: а) по данным 1996 года; б) по данным 1997 года

Там же приведено расстояние в парсеках до Геминги (160 парсек), измеренное по параллаксу в оптическом диапазоне (Каравео и др., 1994), возраст в годах и полные потери вращательной энергии нейтронной звездой (\dot{E}). Отметим, что мощность излучения в области высоких энергий (> 100 МэВ) (ВЭ) составляет 20% полной потери вращательной энергии, а в области сверхвысоких энергий – всего 1.5%, т.е. на порядок ниже. Для пульсара Крабовидной туманности мощность излучения в области высоких энергий (> 100 МэВ) (Хартман, 1999) составляет всего 0.05% полной потери вращательной энергии нейтронной звездой, такое различие возможно объяснить различием возрастов пульсаров. Пульсар Геминги на два порядка старше пульсара в Крабе. В работе (Нешпор, Степанян, 1991) показано, что доля потерь энергии в радиодиапазоне в соотношении к полным потерям вращательной энергии пульсара увеличивается пропорционально возрасту. Отметим, что из 700 радиопульсаров (Тейлор, Кордес, 1993; Тейлор, Манчестер, 1993) 20-являются также источниками рентгеновского излучения, а 7-излучают и в гамма-диапазоне высоких энергий. Пинг-Вай Квок (1993) приводит данные о гамма-потоках в области высоких энергий для пяти пульсаров (см. таблицу 3). В табл. 3 также приводятся величины возрастов для данных пульсаров. В работах (Герасимов и др., 1981; Нешпор, 1991; Смит, 1979) было показано, что характеристический возраст пульсаров

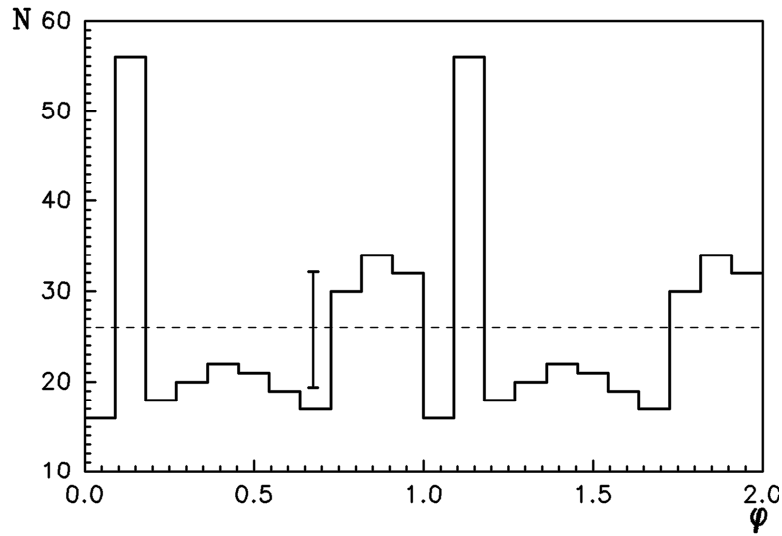


Рис. 4. Суммарная фазовая гистограмма по данным двух лет. φ – фаза в долях периода, N – число гамма-подобных событий

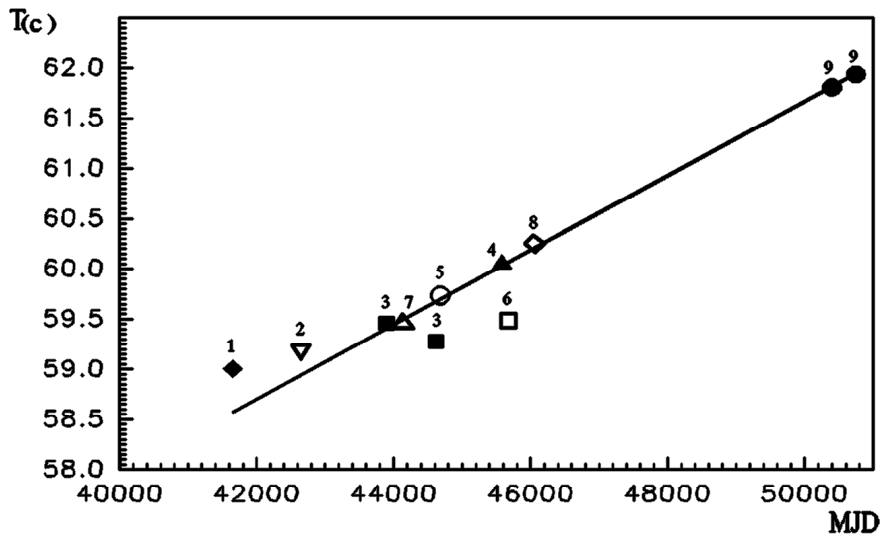


Рис. 5. Зависимость периода от времени по опубликованным данным: 1 – Томпсон и др. 1977; 2 – Масноу и др. 1977; 3 – Зыскин и Муканов 1983; 4 – Биньями и др. 1984; 5 – Биньями и др. 1984; 6 – Зыскин 1988; 7 – Биньями и др. 1984; 8 – Коул и др. 1985; 9 – настоящая работа

Таблица 2. Мощность излучения

Пульсар	Расстояние (пк)	Радио (эрг/с) $lg L_p$	Оптика (эрг/с) $lg L_{опт}$	X-излуч. (эрг/с) $lg L_x$	Гамма (эрг/с) $lg L_\gamma$	Гамма (эрг/с) $lg L_c$	Полные потери эрг/с $lg \dot{E}$	Возраст $lg t$
Geminga	160	24.3-25.2 [1]	27.7 [2]	30.6 [3]	33.8 [4]	32.7 [5]	34.5	5.04
Crab	2000	29.2	36.5	37.4	35.3	34.0	38.7	2.96

L_γ – мощность гамма – излучения ВЭ, L_c – мощность гамма – излучения СВЭ. [1] Малофеев, Малов, 1997; [2] Биньями и др., 1996; [3] Галперн и Холт., 1992; [4] Масноу и др., 1981; [5] Нешпор и др., 2001.

$\tau = \frac{1}{2}T/\dot{T}$ всегда больше истинного и, как правило, значительно, поэтому для определения возраста пульсара используем империческое соотношение (Нешпор, 1991):

$$\lg t = 22.3 - 0.5 \cdot \lg \dot{E}(t),$$

где t -возраст пульсара(в годах), $\dot{E}(t)$ – полные потери вращательной энергии пульсаром в эрг/с. Из этого соотношения следует, что возраст пульсара Геминги составляет $t = 1.1 \cdot 10^5$ лет, а не как это следует из характеристического возраста $\tau = 3.4 \cdot 10^5$ лет.

Таблица 3. Пульсары

Пульсар	Период (мс)	Расстояние (пк)	B_o (Гс)	L_γ (эрг/с)	L_γ/\dot{E} (%)	t лет	\dot{E} (эрг/с)
Crab	33.390	2000	3.8×10^{12}	3.22×10^{34}	0.01	912	$4.7 \cdot 10^{38}$
Vela	89.235	500	3.4×10^{12}	1.53×10^{34}	0.22	$7.4 \cdot 10^3$	$7.1 \cdot 10^{36}$
PSR 1706-44	102.448	1820	3.1×10^{12}	1.72×10^{34}	0.50	$1.1 \cdot 10^4$	$3.4 \cdot 10^{36}$
PSR 1055-52	197.110	1530	1.1×10^{12}	4.19×10^{33}	13.95	$1.1 \cdot 10^5$	$3.4 \cdot 10^{34}$
Geminga	237.097	160	1.6×10^{12}	1.26×10^{33}	3.86	$1.1 \cdot 10^5$	$3.2 \cdot 10^{34}$

На основании данных табл.3 на рис. 6 представлена зависимость величины $\lg(L_\gamma/\dot{E})$ от возраста пульсара, которая, как видно из этого рисунка, растет с увеличением возраста.

Величина вращательной энергии \dot{E} падает с увеличением возраста пульсара (см. рис. 7), а также (Нешпор, 1991). Отметим, что если полные потери энергии \dot{E} с увеличением возраста уменьшаются на четыре порядка (см. рис. 7), то потоки излучения в гамма-диапазоне ВЭ уменьшаются всего лишь на один порядок (см. табл. 3). В таблице 3 также представлены значения магнитных полей, вычисленные из соотношения (см. Манчестер, Тейлор, 1980): $B_o = (3.2 \cdot 10^{19}(\dot{T} \cdot T)^{1/2})(\text{Гс})$, где период T в секундах. Величина $1.6 \cdot 10^{12}$ Гс соответствует типичному для радиопульсаров магнитному полю, что дало основание включить Гемингу в каталог радиопульсаров (Тейлор, Кордес, 1993) Особо подчеркнем, что параметры пульсара Геминги очень хорошо вписываются в общую схему параметров, указанных выше пульсаров разного возраста. Таким образом, пульсар Геминга не выделяется среди других пульсаров величиной потока в области гамма-излучения высоких энергий,

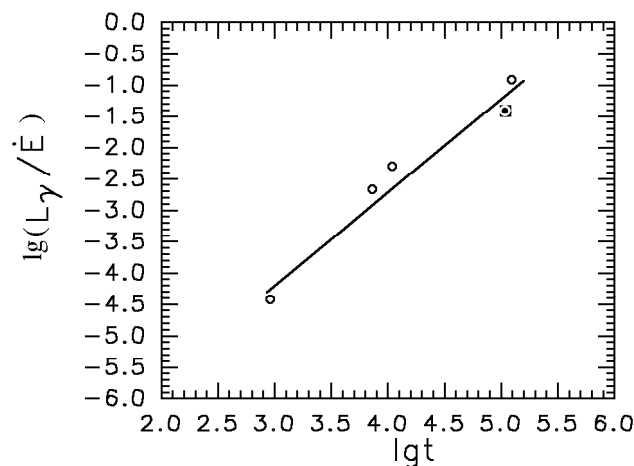


Рис. 6. Зависимость величины $\lg(L_\gamma/\dot{E})$ от возраста пульсара. Затемненным кружочком обозначено значение для Геминги

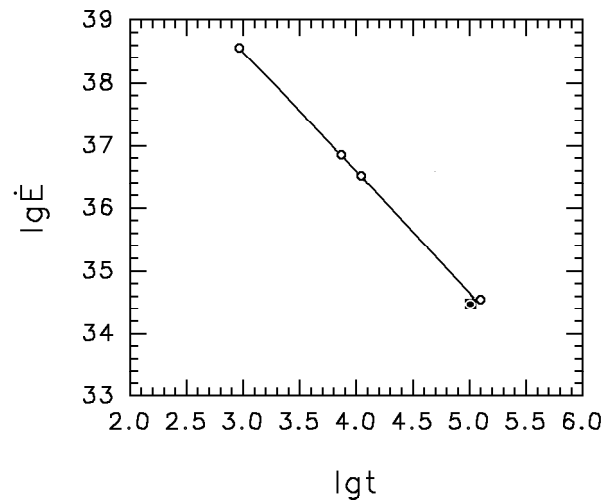


Рис. 7. Зависимость величины скорости полных потерь энергии от возраста пульсара. Затемненным кружочком отмечено значение для Геминги

но выделяется очень малым излучением в радио диапазоне. Геминга имеет наименьшую радиосветимость среди пульсаров, измеренных на частоте 102 МГц. Предложено несколько интерпретаций низкой радиосветимости (Малофеев, Малов, 1997; Малов, 1998; Кузьмин, Лосовский, 1999), но отдать предпочтение какой-либо одной в настоящее время нет достаточных оснований.

6 Заключение

Таким образом, в результате анализа данных наблюдений пульсара Геминга получены следующие результаты:

1. В направлении пульсара Геминги наблюдается поток гамма-квантов сверхвысоких энергий.
2. Показано наличие периодической составляющей потока гамма-квантов сверхвысокой энергии с периодом 0.237 с. Вероятность случайного распределения потока по фазе равна 0.3%.
3. Определено с высокой точностью значение “59-секундного” периода и его производной по времени. Полагаем, представленные данные анализа наблюдений гамма – квантов сверхвысоких энергий прибавляют уверенности в реальности “59-секундного” периода.
4. Отмечена некоторая особенность пульсара в Геминге по сравнению с Крабом. Мощность излучения Геминги в гамма-диапазоне высоких энергий значительно превышает излучения в рентгеновском и оптическом диапазонах. Для пульсара в Крабе имеем обратную картину. В тоже время Геминга не выделяется среди гамма-пульсаров мощностью излучения в гамма-диапазоне ВЭ.

Автор благодарит Н.А. Жоголева за обеспечение нормальной работы аппаратуры, З.Н. Скируту и С.Г. Кочеткову за помощь в обработке данных и подготовке статьи.

Литература

- Агаронян и др. (Aharonian F.A., Ahperjamian A.G. and Bario J.R.) // *Astron. Astrophys.* 1999. V. 346. P. 913.
- Акерлоф и др. (Akerlof C.W., Breslin A.C., Cawley M.F. et al.) // *Astron. Astrophys.* 1993. V. 274. L. 17.
- Акимов В.В., Афанасьев В.Г., Блохинцев И.Д., и др. // *Письма в Астрон. журн.* 1993. Т. 19. С. 579.
- Бертш и др. (Bertsch D.L., Brazier K.T.S., Fichtel C.E. et al.) // *Nature.* 1992. V. 357. P. 306.

- Биньями и др. (Bignami G.F., Caraveo P.A., Lamb R.C.) // *Astrophys. J. Lett.* 1983. V. 272. L. 9.
- Биньями и др. (Bignami G.F., Caraveo P.A., Paul J.A.) // *Nature*. 1984. V. 310. P. 464.
- Биньями и др. (Bignami G.F., Caraveo P.A., Paul J.A. et al.) // *Astrophys. J.* 1987. V. 319. P. 350.
- Биньями и Каравео (Bignami G.F. and Caraveo P.A.) // *Nature*. 1992. V. 357. P. 287.
- Биньями и др. (Bignami G.F., Caraveo P.A., Mignami R. et al.) // *Astrophys. J. Lett.* 1996. V. 456. L. 111.
- Боуден и др. (Bowden C.C.G., Bradbury S.M., Chadwick P.M. et al.) // *J. Phys. G.* 1993. V. 19. L. 29.
- Букчери и др. (Buccheri R., D'Amico N., Hermsen W., Sacco B.) // *Nature*. 1985. V. 316. P. 131.
- Вишванат и др. (Vishwanath P.R., Satyanarayana G.P., Ramanamurty P.V. et al.) // *Astron. Astrophys.* 1993. V. 267. L. 5.
- Владимирский Б.М., Зыскин Ю.Л., Корниенко А.П. и др. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1994. Т. 91. С. 74.
- Галперн и Холт (Halpern J.P. and Holt S.S.) // *Nature*. 1992. V. 357. P. 222.
- Гермсен и др. (Hermsen W., Swanenburg B.N., Buccheri R. et al.) // 1992. IAU circ. 5541.
- Зыскин Ю.Л. и Муканов Д.Б. // *Письма в Астрон. журн.* 1983. Т. 9. С. 219.
- Зыскин (Zyskin Yu.L.) // *Space Science Reviews*. 1988. V. 49. P. 49.
- Калекин О.Р., Нешпор Ю.И., Степанян А.А. и др. // *Письма в Астрон. журн.* 1995. Т. 21. С. 184.
- Каравео и др. (Caraveo P.A., Bignami G.F., Mereghetti S.) // *Astrophys. J.* 1994. V. 422. P. L. 87.
- Каул и др. (Kaul R.K., Rawat H.S., Sanecha V.K., et al.) // *Proc. 19th Int. Cosmic Ray Conf., La Jolla, U.S.A.* 1985. V. 1. P. 165.
- Книффен и др. (Kniffen D.A., Bignami G.F., Fichtel C.E. et al.) // *Proc. 14th Int. Cosmic Ray Conf., Munchen.* 1975. V. 1. P. 100.
- Коули и др. (Cawley M.F., Clear J., Fegan D.J. et al.) // *Proc. 18th Int. Cosmic Ray Conf., Bangalore, India.* 1983. V. 1. P. 118.
- Кузьмин А.Д., Лосовский Б.Я. // *Письма в Астрон. журн.* 1999. Т. 25. С. 108.
- Кузьмин А.Д., Лосовский Б.Я. // *Письма в Астрон. журн.* 1997. Т. 23. С. 323.
- Малов И.Ф. // *Астрон. журн.* 1998. Т. 75. С. 281.
- Малофеев и Малов, (Malofeev V.M., Malov O.I.) // *Nature*. 1997. V. 389. P. 687.
- Манчестер Р., Тейлор Дж. // *Пульсары. М.: Мир.* 1980.
- Масноу и др. (Masnou J.L., Bennet K., Bignami G.F. et al.) // *Proc. 12th ESLAB Symp., Frascati.* 1977. P. 33.
- Масноу и др. (Masnou J.L., Bennett K., Bignami G.F. et al.) // *Proc. 17th Int. Cosmic Ray Conf., Paris.* 1981. V. 1. P. 177.
- Маттокс и др. (Mattox J.R., Bertsch D.L., Fichtel C.E. et al.) // *Astrophys. J. Lett.* 1992. V. 401. L. 23.
- Маттокс и др. (Mattox J.R., Halpern J.P. and Caraveo P.A.) // *Astrophys. J.* 1998. V. 493. P. 891.
- Нешпор Ю.И., Степанян А.А., Калекин О.Р. и др. // *Письма в Астрон. журн.* 1998. Т. 24. С. 167.
- Нешпор Ю.И. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1991. Т. 83. С. 242.
- Нешпор Ю.И., Степанян А.А. // *Астрон. журн.* 1991. Т. 68. С. 992.
- Нешпор Ю.И., Степанян А.А., Зыскин Ю.Л. и др. // *Письма в Астрон. журн.* 2001. Т. 27. С. 228.
- Нешпор Ю.И., Жоголев Н.А., Калекин О.Р. и др. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2003. Т. 99. (в печати).
- Степанян А.А., Фомин В.П., Владимирский Б.М. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1983. Т. 66. С. 234.
- Тейлор, Кордес (Taylor J.H., Cordes J.M.) // *Ap.J.* 1993. V. 411. P. 674.
- Тейлор и др. (Taylor J.H., Manchester R.N., Lyne A.G.) // *Ap.J. Suppl. Ser.* 1993. V. 88. P. 529.
- Томпсон и др. (Thompson D.J., Fichtel C.E., Hartman R.C.) // *Astrophys. J.* 1977. V. 213. P. 252.
- Хартман и др. (Hartman R.C., Bertsch D.L., Bloom S.D. et al.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1999. V. 123. P. 79.
- Чаленко и др. (Chalenko N.N., Kalekin O.R., Neshpor Yu.I., Stepanian A.A.) // *J. Astrophys. Astr.* 1997. V. 18. P. 151.
- Шитов и Пугачев (Shitov Yu.P. and Pugachev V.D.) // *New Astronomy*. 1997. V. 3. P. 101.