

УДК 524.7

**Два состояния ядра галактики NGC 4151,
спокойное и активное**В. А. Котов¹, В. М. Лютый², В. Г. Метлов², В. И. Ханейчук¹¹Крымская астрофизическая обсерватория,
98409, Крым, п. Научный,²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга,
119899, Москва, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

В изучении активных ядер галактик особый интерес представляет быстрая переменность на протяжении ночи, природа которой остается загадкой, особенно возможное наличие периодической составляющей. Колебания с периодом $P_0 \approx 160.010$ мин ранее были найдены в излучении ядра сейфертовской галактики NGC 4151, но их достоверность часто подвергается сомнению, так как сигнал имеет малую амплитуду, а в некоторые ночи отсутствует. В 1985—1996 гг. в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга и Крымской астрофизической обсерватории выполнена большая серия фотометрических наблюдений NGC 4151 (39 и 51 ночей в полосах U и V соответственно). Менее половины ночей показали наличие переменности в течение ночи значимой амплитуды, превышающей 0.03^m . Колебание с периодом P_0 отчетливо наблюдалось именно в «активные» ночи; в остальные, «спокойные» ночи, оно было практически необнаружимо. Средняя гармоническая амплитуда A_h колебания P_0 в активном состоянии ядра составляет около 0.009^m (U-величины), тогда как в спокойном состоянии $A_h < 0.0008^m$. Природа такой модуляции неизвестна. Приводятся аргументы в пользу космологического происхождения колебания P_0 .

ДВА СТАНИ ЯДРА ГАЛАКТИКИ NGC 4151, СПОКІЙНИЙ ТА АКТИВНИЙ, Котов В. О., Лютий В. М., Метлов В. Г., Ханейчук В. І. — При вивченні активних ядер галактик особливу увагу викликає швидко змінність протягом ночі, природа якої залишається загадкою, особливо можлива наявність періодичної складової. Коливання з періодом $P_0 \approx 160.010$ хв раніше були знайдені у випромінюванні ядра сейфертівської галактики NGC 4151, але їхня достовірність часто піддається сумніву, бо амплітуда сигналу мала, а в деякі ночі сигнал відсутній. В 1985—1996 рр. в Державному астрономічному інституті ім. П. К. Штернберга і в Кримській астрофізичній обсерваторії виконана велика серія фотометричних спостережень NGC 4151 (39 та 51 ночей у смугах U і V відповідно). Менше половини ночей показали наявність значимої змін-

ності понад 0.03^m протягом ночі. Коливання з періодом P_0 чітко спостерігались саме в «активні» ночі; в інші, «спокійні» ночі, воно практично не виявлялось. Середня гармонічна амплітуда A_n коливання P_0 в активному стані ядра складає близько 0.009^m (U -величини), тоді як в спокійному стані $A_n < 0.0008^m$. Природа такої модуляції невідома. Приводяться аргументи на користь космологічного походження коливання P_0 .

TWO STATES OF THE NUCLEUS OF THE NGC 4151 GALAXY, QUIET AND ACTIVE, by Kotov V. A., Lyuty V. M., Metlov V. G., Haneychuk V. I. — The most interesting phenomenon in the studies of active galactic nuclei is their rapid variability over one night whose origin remains mysterious, and of special interest is the search for the presence of a periodic component. The oscillation with the period $P_0 \approx 160.010$ min was found earlier in the emission of the nucleus of the Seyfert galaxy NGC 4151, but its authenticity is often doubted. The reasons for the scepticism are a small amplitude of the signal and the fact that the oscillation is absent during some nights. In 1985—1996 the observers of the P. K. Sternberg State Astronomical Institute and the Crimean Astrophysical Observatory carried out long series of photometric observations of NGC 4151 (in all, 39 and 51 nights in the U and V bands, respectively). Less than a half of the nights a significant variability over a night which exceeded 0.03 -mag threshold (it was treated with no relation to any a priori periodicity). But the most important is that the P_0 -oscillation was clearly seen exactly during those “active” nights; other, “quiet”, nights did not reveal any noticeable periodic signal. The mean harmonic amplitude of the P_0 -oscillation during the active state of the NGC 4151 nucleus is found to be about 0.009^m (U -band), while it is not larger than 0.0008^m in the same band during the quiet state. The nature of such a strange modulation is unknown. The arguments are given in favour of a cosmological origin of the P_0 -oscillation.

1. ВВЕДЕНИЕ

Активные ядра галактик (АЯГ) — сверхмассивные и компактные внегалактические объекты — предоставляют уникальную возможность для решения многих проблем релятивистской астрофизики (например, изучение черных дыр) и космологии. Детальное исследование быстрой (на временной шкале от суток до минут) переменности АЯГ может дать ключевую информацию об истинной физической природе этих объектов, а также о механизмах, ответственных за их громадное энерговыделение (см. обзоры [18, 19]). Большинство исследователей считает, что типичное АЯГ излучает за счет аккреции вещества на сверхмассивную черную дыру. Именно аккреция с трансформацией гравитационной энергии в излучение ответственна за все наиболее энергичные явления, включая быструю переменность.

Более десятилетия назад сообщалось [2, 3] о возможной периодичности 160.0098 ± 0.0005 мин вариаций блеска ядра сейфертовской галактики NGC 4151. Результат вскоре был подтвержден на гораздо более обширном наблюдательном материале, включая рентгеновские измерения, выполненные на спутниках «Ariel-5», EXOSAT и «Ginga» [5, 9, 15]. Проблема в том, что такой же, в пределах ошибки, период был ранее найден в спектре мощности глобальных пульсаций Солнца [11, 12, 21, 22]. «Солнечный» период $P_0 = 160.0101 \pm 0.0001$ мин поразительно точно совпал с периодом NGC 4151, и это, с точки зрения оппонентов, говорит о его земном происхождении (см., однако, дискуссию [1, 10]). То, что временной ряд не является непрерывным и имеет большое число пропусков, усиливает сомнения оппонентов в реальности эффекта P_0 . Решение вопроса может состоять

в накоплении наблюдательных данных и особенно — квазинепрерывных в течение ночи, с более высоким отношением сигнал/шум. С этой целью здесь мы анализируем новые наблюдения NGC 4151, выполненные за последние 16 лет.

Явление периодичности P_0 , согласно [4], обнаруживается у 23 АЯГ. Примечательно, что распределение начальных фаз колебания носит, по-видимому, бимодальный характер. Однако для некоторых внегалактических объектов, вошедших в тот анализ, эффект пока мало достоверен ввиду небольшого числа измерений блеска. Поэтому мы уделяем исключительное внимание лишь одному объекту — ядру сейфертовской галактики NGC 4151. Для него к настоящему времени получен наиболее обширный ряд наблюдательных данных, охватывающий более 25 лет, и ни один другой объект пока не может сравниться с NGC 4151 по числу пригодных для анализа измерений светимости.

Ранее аналогичные данные о быстрых вариациях светимости NGC 4151 рассматривались в работе [14]. При этом ночи с «хаотической» переменностью («активные») и без таковой («спокойные») не разделялись или отдельный анализ делался только для ночей с «хаотической» переменностью, спокойные же ночи игнорировались. Показано, что в данных 1968—1994 гг. был периодический сигнал P_0 с высокой достоверностью 99.97 % (или 3.6σ , где σ — стандартное отклонение).

Здесь мы более четко проводим деление ночей на спокойные и активные; деление делается конечно, безотносительно к какой-либо подозреваемой периодичности. Суммарное число данных по сравнению с предыдущей работой увеличилось с 2771 до 3494, т. е. примерно на 27 %, и можно уверенно сказать, что колебание P_0 действительно наблюдается не всегда. Во время спокойных ночей оно практически отсутствует (см. пп. 5 и 7). Зато эта загадочная периодичность четко, с большим уровнем достоверности и заметной относительной амплитудой, около 1 %, обнаруживается в те ночи, когда имеет место вообще быстрая хаотическая переменность блеска АЯГ.

2. ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ 1985—1996 гг.

Первые результаты [2, 3] основывались на анализе рутинных фотометрических данных, представлявших собой отдельные U -измерения, выполненные одним из авторов (ВМЛ) в 1968—1986 гг. (одно-два абсолютных измерений блеска за ночь). Такой временной ряд, естественно, мало подходит для поиска малоамплитудной периодичности; а без априорной гипотезы о возможном компоненте P_0 вообще не годится для анализа с помощью фурье-преобразования. С 1985 г. начаты длительные, квазинепрерывные в течение ночи, наблюдения за переменностью источника относительно звезды сравнения.

Рассматриваемая серия наблюдений сделана в 1985—1996 гг. в течение 28 ночей с помощью инструментов Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга (в основном — на 60-см рефлекторе Крымской станции ГАИШ) и в течение 23 ночей — на 125-см рефлекторе Крымской астрофизической обсерватории (КрАО). Получены оценки блеска NGC 4151 в широких фотометрических полосах U и V . Из этих и ранее опубликованных данных U -, V -фотометрии составлен общий временной ряд, включая рентгеновские измерения, сделанные в 1975—1991 гг. несколькими спутниками. Информация о всех предыдущих измерениях, методах анализа и полученных результатах содержится в работах [3, 4, 13, 14].

Таблица 1. Характеристики U-, V-наблюдений ядра NGC 4151, выполненных в ГАИШ и не вошедшие в [14]

№ п/п	Дата (UT)	L, ч	Полоса U			Полоса V		
			N	Δ	Переменность	N	Δ	Переменность
1	25 апреля 1985 г.	6.3	14	0.009 ^m	—	14	0.008 ^m	—
2	26 апреля 1985 г.	5.0	18	0.016	+	18	0.011	—
3	3 февраля 1995 г.	3.4	26	0.010	—	26	0.009	—
4	1—2 марта 1995 г.	3.8	45	0.010	—	45	0.010	—
5	2—3 марта 1995 г.	4.4	50	0.010	—	50	0.009	—
6	3—4 марта 1995 г.	3.1	36	0.011	—	35	0.010	—
7	24 мая 1995 г.	3.1	40	0.009	—	40	0.009	—
8	25 мая 1995 г.	3.4	40	0.017	+	41	0.014	+
9	19 февраля 1996 г.	2.7	24	0.010	—	24	0.008	—
10	18 марта 1996 г.	2.5	20	0.009	—	20	0.007	—
11	20 марта 1996 г.	3.4	27	0.014	—	28	0.007	—
12	26 апреля 1996 г.	2.6	21	0.008	—	21	0.009	—
Всего	1985, 1995 и 1996 гг.	43.7	361	0.011		362	0.010	

Данные усреднены, как правило, в 5-мин интервалах; моменты измерений определены с точностью не хуже чем ± 1 мин, и перед обработкой они приводились к Солнцу. В общий массив данных вошли лишь ночи с продолжительностью наблюдений не менее двух часов. Медленные тренды в течение ночи удалялись стандартной процедурой, с помощью парабол или прямых линий. Приводимые погрешности всюду соответствуют примерно стандартной ошибке $\pm 1\sigma$.

Дополнительный наблюдательный материал, не вошедший в [14], получен в ГАИШ в 1985, 1995 и 1996 гг. В табл. 1 приведены: длительность наблюдений L , число N отдельных измерений блеска (остатков δ , после низкочастотной фильтрации), стандартное отклонение массива Δ .

3. СЕЛЕКЦИЯ НОЧЕЙ

Известно, что в некоторые ночи данный источник не показывает заметной, т.е. превышающей уровень шумов, переменности [6, 8, 17]. Включение таких «спокойных» ночей в анализ данных на периодичность в определенной мере эквивалентно добавлению «нулей» (более точно, малоамплитудных шумов), что может повлиять на статистическую значимость конечного результата. Что касается периодичности P_0 , то нами давно замечено, что ее амплитуда в оптике также сильно варьирует от ночи к ночи, а иногда сигнал вообще пропадает, что сильно затрудняет анализ данных. Однако при возобновлении сигнала с периодом P_0 фаза его сохраняется. Такое поведение характерно, например, для радиопульсаров. Это значит, что причина, вызывающая периодичность, остается.

Как говорилось выше, ранее анализ данных делался без всякой селекции ночей [4, 5, 13—15] или же рассматривались только активные ночи [14]. Здесь мы исходим из факта, что типичная ошибка фотометрических измерений для NGC 4151 составляет $\sigma_0 \approx 0.01^m$ [8]. Поэтому, как и ранее [14], применяем следующий эмпирический критерий: данная ночь относится к числу активных, т.е. с заметной переменностью, если хоть одно значение $\delta \geq 3\sigma_0 = 0.03^m$; остальные ночи считаем спокойными.

Важно подчеркнуть, что селекция производится безотносительно к какой-либо возможной периодичности (т.е. разделение ночей на два типа

делаем как бы совсем забыв о поиске периодичности). Это гарантирует объективность анализа.

За весь 12-летний интервал из 39 ночей в U -фильтре по критерию $3\sigma_0$ 17 ночей были отнесены к активным, остальные 22 — к спокойным ночам. Для измерений в полосе V число соответствующих ночей составляет 51, 15 и 36. Исходя из суммарной длительности наблюдений (табл. 2) можно заключить, что около 45 % ночей в полосе U относятся к разряду активных. По числу часов U -активность также наблюдалась в течение примерно 45 % интервала, охваченного наблюдениями; для полосы V — около 30 % как по числу ночей, так и по числу часов. Активные и спокойные ночи в табл. 1 отмечены знаками «+» и «-». Примеры измерений V -блеска в активные и спокойные ночи приведены в работах [6, 8].

Наблюдения 1985—1996 гг. рассматриваются совместно с предыдущими рядами U -данных 1968—1994 гг. (отдельные рутинные измерения, $N = 407$, $\Delta = 0.082^m$) и рентгеновских (X) измерений 1975—1991 гг. ($N = 553$, $\Delta = 0.181^m$; [14]). Эти два ряда нами формально отнесены также к типу активного состояния АЯГ, так как для них значительное число остатков δ превышают порог 0.03^m .

4. СВОДКА НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Итак, для дальнейшего анализа имеем шесть временных рядов NGC 4151 (ср. выборку в [14]):

- 1) U -измерения 1968—1994 гг., представляющие собой остатки δ рутинных фотометрических наблюдений,
- 2) рентгеновские (X) измерения 1975—1991 гг.,
- 3) U -данные 1985—1995 гг., полученные в ночи активного состояния АЯГ,
- 4) V -данные 1987—1995 гг., относящиеся к активному состоянию,
- 5) U -данные в спокойные ночи 1985—1996 гг.,
- 6) V -данные 1985—1996 гг., спокойные ночи.

Рентгеновские данные были получены в 1975—1991 гг. спутниками «Ariel-5», EXOSAT и «Ginga» в области энергий 2—10 кэВ. Нами они обрабатывались на основе опубликованных таблиц или графиков (измерения «Ariel-5» в виде таблиц были любезно предоставлены Лоуренсом [16]). Более подробно обо всех X -данных, рассматриваемых здесь, методе обработки и предварительных результатах см. [9, 13, 14]. Медленные тренды, как и для оптических измерений, снимались с помощью парабол или прямых линий, и в дальнейшем анализировались остатки «измерения минус тренд».

Общая характеристика материала содержится в табл. 2. При дальнейшей обработке, с целью сведения двух или нескольких рядов в единую

Таблица 2. Данные наблюдений NGC 4151 в 1968—1996 гг.

Фильтр	Интервал	Число ночей	L, ч	N	Δ	Активность
U (рутинная фотометрия)	1968—1994	—	—	407	0.082	+
U (активные ночи)	1985—1995	17	62.9	436	0.028	+
U (спокойные ночи)	1985—1996	22	76.4	637	0.010	—
V (активные ночи)	1987—1995	15	54.6	434	0.027	+
V (спокойные ночи)	1985—1996	36	137.6	1027	0.010	—
X	1975—1991	—	—	553	0.181	+
U (все ночи)	1985—1996	39	139.3	1073	0.020	
U (в целом)	1968—1996	—	—	1480	0.046	
V (все ночи)	1985—1996	51	192.2	1461	0.017	
X, U, V (в целом)	1968—1996	—	—	3494	—	

временную последовательность, стандартные отклонения X - и V -рядов (Δ_X , Δ_V) приводились к стандартному отклонению соответствующего U -ряда Δ_U (путем умножения остатков δ на коэффициенты Δ_U/Δ_X и Δ_U/Δ_V соответственно). В итоге получены две временные последовательности:

а) «активный» ряд, включающий рутинные U -измерения, X -измерения и «активные» U - и V -ночи (при этом X - и V -дисперсии приводились к дисперсии «активных» U -остатков),

б) «спокойный» ряд, включающий «спокойные» U - и V -ночи (дисперсия V -остатков была приведена к дисперсии «спокойных» U -остатков).

5. КОЛЕБАНИЕ С АПРИОРНЫМ ПЕРИОДОМ P_0

Наша главная задача — получить средние кривые блеска и спектры мощности отдельно для двух состояний ядра, активного и спокойного. Подчеркнем, что: полное число остатков по сравнению с [14] возросло на 27 % и ранее нами не строились ни средняя P_0 -кривая блеска, ни спектр мощности отдельно для спокойного состояния АЯГ.

Очевидно, что если априорная периодичность P_0 и так называемая «быстрая хаотическая переменность» — мнимые, то «активные» ряды должны представлять выборку наблюдений (остатков) не с реальной переменностью, а выборку, отягощенную шумами разного происхождения. В таких рядах менее вероятно найти какой-либо значимый периодический сигнал, чем в «спокойных» рядах. (Ниже увидим, что все обстоит как раз наоборот!)

На рис. 1 показаны средние кривые, построенные с периодом $P_0 = 160.0101$ мин для трех активных рядов: для рентгеновских данных (остатков) 1975—1991 гг., U -данных 1968—1995 гг. и V -данных 1987—1995 гг. (см. аналогичные «активные» кривые, но для меньшего числа наблюдений в [14]).

Гармонические фазы трех кривых довольно близки друг к другу: $\varphi = 0.42 \pm 0.06$, 0.57 ± 0.06 и 0.62 ± 0.06 соответственно для X -, U - и V -рядов. Еще лучше согласуются «пиковые» минимумы блеска, которые совпадают в пределах ошибок: $\psi = 0.00 \pm 0.07$, 0.04 ± 0.08 и 0.09 ± 0.07 для X -, U - и V -данных соответственно. Приводим также гармонические амплитуды A_h и

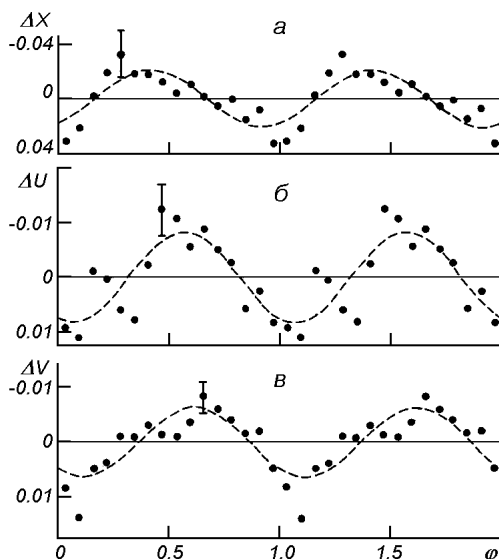


Рис. 1. Средние P_0 -кривые для трех временных рядов, относящихся к активному состоянию ядра NGC 4151: а — рентгеновские данные 1975—1991 гг., $N = 553$, б — U -измерения 1968—1995 гг., $N = 843$ и в — V -данные 1987—1995 гг., $N = 434$. Штриховые линии — МНК-аппроксимация синусоидой; интервал усреднения по фазе $\tau \approx 30$ мин. Нулевая фаза отвечает моменту UT 00^h00^m 1 января 1974 г. (то же — на рис. 2)

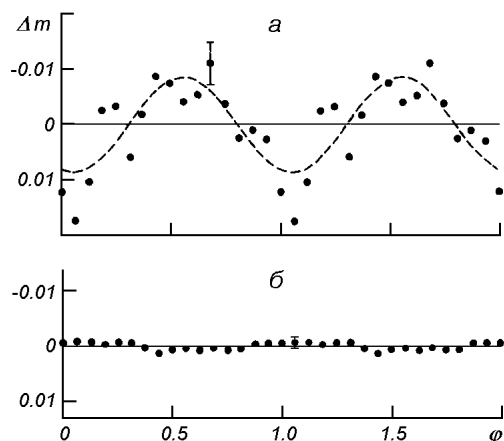


Рис. 2. Средние P_0 -кривые для: *a* — суммарного активного ряда 1968—1995 гг. (данные X -, U - и V -наблюдений, $N = 1830$); *б* — спокойного ряда 1985—1996 гг. (U - и V -наблюдения, $N = 1664$); $\tau \approx 20$ мин

значимости P кривых: $A_h = 0.020 \pm 0.007^m$ и $P \approx 2.9\sigma$, $A_h = 0.008 \pm 0.003^m$ и $P \approx 3.4\sigma$, $A_h = 0.006 \pm 0.002^m$ и $P \approx 4.3\sigma$ — по порядку для X -, U - и V -фильтров.

Мы затем объединили все активные ряды 1—4 в единый активный ряд 1968—1995 гг., с общим числом остатков $N = 1830$ и $\Delta = 0.061^m$. При этом стандартные отклонения X -ряда и активного V -ряда были приведены к Δ активного U -ряда 1968—1995 гг. Результат свертки с периодом P_0 — на рис. 2, *a*, где видим значимую синусоиду с амплитудой $A_h = 0.009 \pm 0.003^m$ и фазой $\varphi = 0.56 \pm 0.06$ ($P \approx 4.2\sigma$).

Совсем другой результат имеем на рис. 2, *б* для суммарного спокойного ряда (U - и V -данные 1985—1996 гг., полученные в спокойные ночи; $N = 1664$); здесь верхний предел для амплитуды A_h периодического компонента составляет 0.0008^m , что на порядок меньше, чем средняя амплитуда активного ряда.

6. СПЕКТР МОЩНОСТИ: ОГРАНИЧЕННОСТЬ ЗАДАЧИ

Спектр мощности (или периодограмму) строим с помощью обычного дискретного фурье-преобразования. Число измерений небольшое, и ряд имеет огромное количество пропусков, поэтому мы ограничились вычислением относительно небольшого фрагмента СМ в районе *заданной* частоты $\nu_0 = P_0^{-1} \approx 104.160$ мкГц, что вполне обоснованно при априорной гипотезе. Впрочем, используемый диапазон частот почти в шесть раз превышает диапазон, для которого СМ строился ранее Котовым и Лютым [3]. Хотя число измерений для активного состояния АЯГ по сравнению с предыдущими данными [14] увеличилось всего лишь на 6 %, привести «активный» спектр здесь мы считаем необходимым: во-первых, для целостности работы, во-вторых, — для удобства сравнения. Особый интерес, как увидим дальше, вызывает спектр, построенный для спокойного состояния ядра.

К сожалению, получить СМ для более полного диапазона пробных частот (по периоду от 10 мин до 4 ч) практически невыполнимо из-за малой амплитуды и огромного числа пробелов (наблюдениями покрыто фактически менее 0.1 % рассматриваемого 29-летнего интервала). Без *априорной гипотезы* о возможной периодичности такую работу делать практически бессмысленно.

Действительно, разрешение по частоте для нашего временного ряда длительностью $L = 29$ лет составляет $\Delta\nu = L^{-1} \approx 1$ нГц. Если в качестве оптимального шага по частоте принять $\Delta\nu/5$, то «полный» СМ необходимо сосчитать для $8 \cdot 10^6$ частот, из которых примерно $1.7 \cdot 10^6$ независимых

частот. Если ряд случайный, более 3000 пиков превзойдут уровень *априорной* значимости $P = 3\sigma$, и примерно 100 пиков — уровень $P = 4\sigma$ (о распределении пиков в гармоническом СМ см. [20]). Конечно, не имеет смысла ни приводить такой СМ, ни анализировать весь список «доминирующих» частот-пигов.

7. ДВА СПЕКТРА МОЩНОСТИ

Спектр мощности для суммарного активного ряда 1968—1995 гг. представлен на рис. 3, *а*. Максимальный пик соответствует периоду $P = 160.0105 \pm 0.0005$ мин. Оценку значимости делаем с учетом экспоненциального характера распределения мощности в гармоническом СМ по известному критерию [20] для случайной вероятности p :

$$p = e^{-\eta},$$

где

$$\eta = \frac{A_h^2}{4\Delta^2} N.$$

Пик считаем *априорным*, т. е. его частоту — заданной *a priori*; задача при этом сводится к определению амплитуды A_h и ее статистической значимости. Для нашей *априорной* частоты ν_0 амплитуда $A_h \approx 0.0087^m$. При

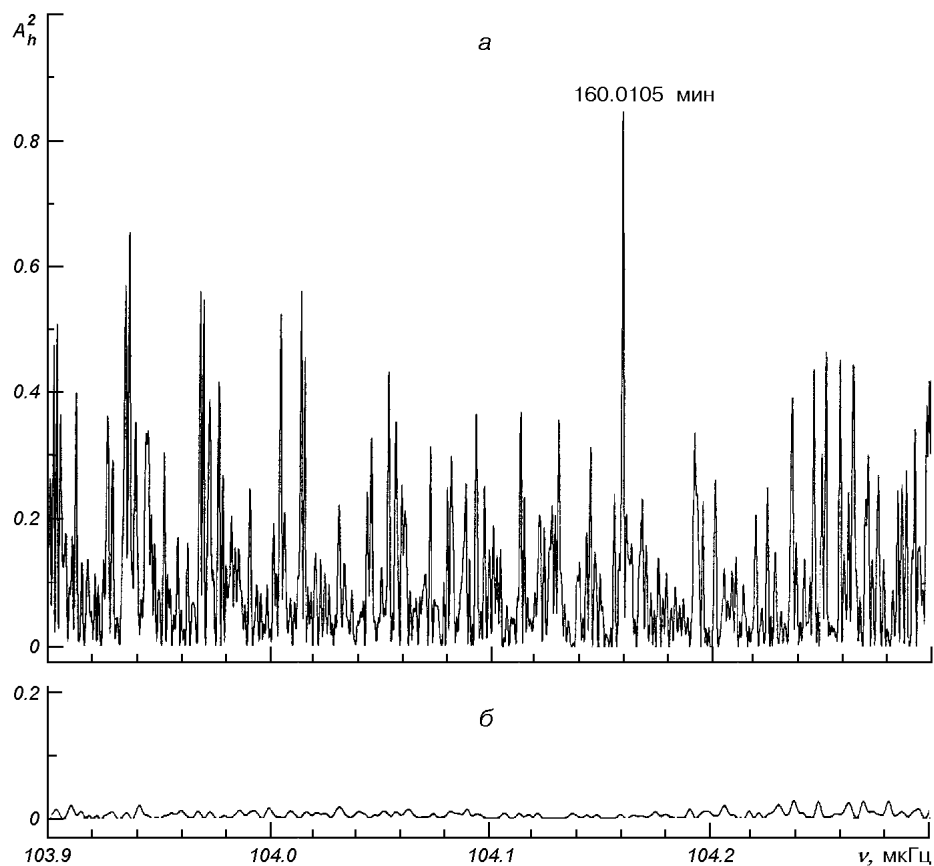


Рис. 3. Спектр мощности вариаций блеска NGC 4151: *а* — в активном состоянии (данные наблюдений в полосах X , U и V за 1968—1995 гг.; $N = 1830$); *б* — в спокойном состоянии 1985—1996 гг. ($N = 1664$). По вертикали — величина A_h^2 в единицах 10^{-4} (зв. вел.)²; шаг по частоте 0.1 нГц

стандартном отклонении ряда $\Delta = 0.061^m$ и $N = 1830$ величина $\eta \approx 9.3$, и значимость пика оцениваем на уровне 3.9σ .

На рис. 3, б показан СМ по U - и V -наблюдениям в спокойные ночи 1985—1996 гг. Видно, что в спокойном состоянии ядро NGC 4151 периодичности P_0 не обнаруживает.

Этот неожиданный результат мы считаем интересным и очень важным, особенно если учесть, что деление на две выборки производилось *исключительно* по критерию $3\sigma_0$ (см. выше). Все же другие потенциальные эффекты и источники погрешностей, на которые ссылаются оппоненты (суточная скважность, так называемый «фотометрический эффект Форбса», фильтрация трендов и т. д.) одинаковы для обеих временных последовательностей. Поэтому теперь можно еще более твердо заявить, что утверждение скептиков о том, что значимый ($P \approx 4\sigma$) пик P_0 обусловлен близостью периода к 1/9-й земных суток и/или погрешностями измерений и математической обработки наблюдений, *несостоятельно*. Кстати, здесь самое время прокомментировать так называемую «близость» периодичности P_0 к 1/9 солнечных суток: невнимательного читателя, видимо, завораживает число «160 минут». На самом же деле для почти 30-летнего ряда наблюдений NGC 4151 период равен 160.0105 ± 0.0005 мин; отличие от 1/9 суток составляет 0.0105 ± 0.0005 мин, или почти 20σ .

При интерпретации СМ мы принимаем во внимание, что некоторые АЯГ, в том числе NGC 4151, обнаруживают иногда сильную переменность с характерными временами 1—3 ч и амплитудой до 0.1^m ; это на порядок больше, чем средняя амплитуда сигнала P_0 . Естественно, что несколько таких единичных событий могут в принципе вызвать появление одного или нескольких заметных пиков на частотах, близких к суточным гармоникам (в основном по причине суточной скважности наблюдений). Этот вопрос специально рассматривался в [2, 3], и было показано, что периодичность P_0 блеска NGC 4151 не может быть обусловлена суточной скважностью. В СМ анализировавшихся данных тогда был только один достоверный (*априорный*) пик 160.0098 ± 0.0005 мин, со значимостью $P = 3.5\sigma$. Теперь мы видим, что добавление большого числа новых данных и выделение «активного» ряда привело к усилению статистической значимости периодичности P_0 (а не к «размыванию» пика и уменьшению его значимости).

Как говорилось выше, некоторые оппоненты указывают, что пик P_0 может быть вызван всего лишь несколькими сильными флюктуациями блеска АЯГ, случайно распределенными во времени. Вероятность этого слишком мала; ответ зависит от статистики, т. е. вероятности события. В нашем случае — для активного ряда — вероятность того, что существенная часть сильных флюктуаций блеска оказалась *случайно* в одинаковой фазе для периода P_0 , составляет $p \approx 10^{-4}$.

Мы не приводим СМ для всего ряда, с объединением спокойных и активных рядов, так как он демонстрирует тривиальное уменьшение значимости периодичности P_0 (до 3.5σ), определяемое относительным числом измерений в спокойные и активные периоды (см. также [14]).

Также не приводим СМ отдельно для X -, U - и V -измерений; дробление временного ряда на части приводит естественно к увеличению шумов и уменьшению значимости априорного пика. Тем не менее, в работе [14] на рис. 4 приведены три СМ для разных выборок данных; полученные СМ отчетливо демонстрируют увеличение относительной амплитуды P_0 -пика при переходе от U -массива ($N = 785$) к $X-U$ -массиву ($N = 1338$) и далее к полному массиву $X-U-V$ ($N = 1731$). В дальнейшем, с увеличением данных, мы планируем построить СМ отдельно для каждого спектрального диапазо-

на. Пока же мы ограничились построением соответствующих средних кривых блеска для X -, U - и V -измерений.

Было бы неплохо исследовать изменения блеска АЯГ в наблюдениях, охватывающих несколько «активных» ночей подряд. Примерно такой анализ сделан — для ЗС 273 — в [3], где показано, что наиболее сильная переменность этого объекта наблюдается именно на частоте 104 мкГц. Необходимо учитывать, однако, что *дифференциальные* наблюдения АЯГ — задача трудоемкая, поэтому квазинепрерывные (в течение ночи) наблюдения за изменениями их блеска производятся, к сожалению, редко. Мы планируем в дальнейшем наблюдать АЯГ (и особенно NGC 4151) более регулярно с целью получения временных рядов, относящихся к «активному» состоянию.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Под переменностью ядра NGC 4151 здесь всюду имеем в виду *быструю* переменность, наблюдаемую в течение ночи по нашему эмпирическому критерию $3\sigma_0 = 0.03^m$. Разделение наблюдений по признаку присутствия или отсутствия такой переменности (безотносительно к какой-либо периодичности вообще) оказывается очень эффективным. А именно, временной ряд с хаотической переменностью показывает и наличие *периодичности* P_0 , причем с высоким уровнем значимости, примерно 3.9σ (вероятность $p \approx 10^{-4}$). Средняя амплитуда колебания P_0 в активной фазе ядра равна $A_h = 0.0087 \pm 0.0030^m$ (по наблюдениям 1968—1995 гг. в шкале U -величин; $N = 1830$). Наблюдения же в спокойной фазе ядра такой периодичности не обнаруживают, по крайней мере на уровне амплитуд $A_h > 0.0008^m$.

Для поиска малоамплитудной периодичности требуются, прежде всего, самые высокоточные измерения блеска. Допустим, что как переменность, так и периодичность — нереальны. Тогда наш суммарный «активный» ряд на самом деле должен представлять собой выборку тех наблюдений, которые самым неблагоприятным образом обременены шумами и ошибками разной природы. Естественно, что для такого «плохого» ряда очень мала вероятность обнаружить периодичность. Фактически все наоборот: «активный» ряд прекрасно демонстрирует периодичность P_0 (см. рис. 2, а и 3), тогда как «спокойный», и, казалось бы, гораздо лучшего качества, ряд никакой заметной периодичности не показывает.

Подчеркнем снова, что это справедливо, если существование колебания P_0 принято *a priori*. Наша ситуация (см. также п. 6) именно такова: без априорной гипотезы данное исследование было бы практически невозможным.

Вопрос фильтрации медленных трендов уже подробно исследовался (см. [15] и ссылки в [14]), и было показано, что процедуры наблюдений и обработки материала не могут вызвать появление статистически значимой априорной} периодичности P_0 . Для активного ряда NGC 4151 случайная вероятность такого события слишком мала ($\approx 10^{-4}$), достоверность нашего результата, следовательно, составляет 99.99 %.

Средняя амплитуда сигнала P_0 по отдельным U -измерениям (одно—два измерения за ночь, $N = 407$) за 1968—1994 гг. составляла 0.012 ± 0.004^m . Она существенно больше, чем средняя амплитуда эффекта ($A_h = 0.005 \pm 0.003^m$), выделенного по квазинепрерывным наблюдениям в течение 15 активных ночей 1989—1994 гг. ($N = 378$, [14]). Различие может показаться подозрительным, и его, казалось бы, следует отнести на счет зависимости эффекта от метода наблюдений и обработки материала. На это сразу заметим, что

1) различие амплитуд находится в пределах формальной погрешности, 2) две указанных выше наблюдательных серии относятся к существенно разным фазам цикла общей активности ядра NGC 4151 (см. [7]). В 1983 г. закончился старый цикл активности, сменившийся продолжительным фотометрическим минимумом 1984—1989 гг., во время которого переменный источник практически не выделялся на уровне фона окружающей галактики. В 1990 г. начался новый цикл активности ядра, максимум которого был достигнут в 1995—1996 гг. Уменьшение амплитуды в 1989—1994 гг. может быть связано именно с тем, что большая часть этих наблюдений получена в минимуме активности ядра. В среднем для всего активного временного ряда 1968—1995 гг. амплитуда P_0 -эффекта $A_p = 0.009 \pm 0.003^m$ в шкале U -величин (см. п. 5).

Представленные здесь результаты — еще одно, в дополнение ко многим ранее изложенным [3—5, 13—15], — свидетельство реальности периодического, с устойчивой начальной фазой, колебания ядра NGC 4151.

Природа этого нового астрофизического явления не ясна, но несомненна его тесная связь с общей (быстрой) переменностью излучения ядра. То обстоятельство, что P_0 -колебание обнаруживается лишь в активном состоянии ядра, подтверждает вывод [7] об изменении геометрии переменного источника при переходе от спокойного состояния к активному.

Совпадение в пределах ошибки периода пульсаций ядра галактики, $P = 160.0105 \pm 0.0005$ мин, с «солнечным» периодом $P_0 = 160.0101 \pm 0.0001$ мин нами трактуется как доказательство космологического происхождения колебания P_0 . Подробнее с космологической гипотезой можно познакомиться в [3, 10, 13]. Не исключено, что феномен P_0 -осцилляции имеет отношение к проблеме поиска монохроматического гравитационного излучения во Вселенной и к проблеме Большого Взрыва.

Авторы признательны В. Т. Дорошенко, Н. И. Меркуловой и Л. П. Метик за активное участие в наблюдениях быстрой переменности АЯГ и возможность воспользоваться материалами наблюдений до публикации, а также О. П. Голландскому и В. И. Пронику за полезное обсуждение полученных результатов и проблемы «космологической осцилляции.» Авторы благодарны также рецензенту за ряд замечаний, способствовавших улучшению статьи.

Работа получила частичную поддержку ГФФИ Украины (грант № Ф 4/174—97).

1. Бирюков В. В., Тербиж В. Ю. Свидетельства 160-минутных колебаний блеска NGC 4151 не обнаружены // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1991.—83.—С. 230—241.
2. Котов В. А., Лютый В. М. Период 160 минут во внегалактических объектах: БМО (звезды типа RR Lyr) и NGC 4151 // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1987.—77.—С. 148—156.
3. Котов В. А., Лютый В. М. Фотометрия сейфертовской галактики NGC 4151 и квазара 3C 273: период 160,010 минут // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1988.—78.—С. 89—111.
4. Котов В. А., Лютый В. М. Пульсации активных ядер галактик и проблема антивещества во Вселенной // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1992.—86.—С. 108—124.
5. Котов В. А., Лютый В. М., Меркулова Н. И. и др. Новые данные о P_0 -колебании ядра сейфертовской галактики NGC 4151 // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—14, № 1.—С. 67—76.
6. Лютый В. М., Асланов А. А., Волков И. М. и др. Исследование быстрой оптической переменности ядра NGC 4151 // Письма в астрон. журн.—1989.—15, № 7.—С. 579—589.
7. Лютый В. М., Дорошенко В. Т. Новый цикл активности NGC 4151: доказательство существования аккреционного диска // Письма в астрон. журн.—1999.—25, № 6.—С. 403—413.
8. Лютый В. М., Дорошенко В. Т., Метлов В. Г., Ирсамбетова Т. Р. Быстрая оптическая

- переменность NGC 7469: *UBV*-фотометрия // Письма в астрон. журн.—1995.—**21**, № 9.—С. 652—669.
9. *Лютый В. М., Котов В. А.* Компактные внегалактические объекты: поиск 160-минутной периодичности в рентгеновских данных // Письма в астрон. журн.—1990.—**16**, № 9.—С. 771—781.
 10. *Лютый В. М., Котов В. А.* К вопросу о 160-минутной переменности NGC 4151: ответ оппонентам // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1992.—**84**.—С. 104—112.
 11. *Brookes J. R., Isaak G. R., van der Raay H. B.* Observation of free oscillations of the Sun // *Nature*.—1976.—**259**, N 5539.—P. 92—95.
 12. *Grec G., Fossat E., Pomerantz M.* Solar oscillations: full disk observations from the geographic South Pole // *Nature*.—1980.—**288**, N 5791.—P. 541—544.
 13. *Kotov V. A., Haneychuk V. I., Lyuty V. M.* Rapid variability of active galactic nuclei: The 160 min periodicity in NGC 3516, NGC 4151 and quasar 3C 273 // *Astron. Nachr.*—1994.—**315**, N 5.—P. 333—342.
 14. *Kotov V. A., Lyuty V. M., Haneychuk V. I., et al.* The long-term periodic oscillation of the NGC 4151 nucleus // *Astrophys. J.*—1997.—**488**, N 1.—P. 195—201.
 15. *Kotov V. A., Lyuty V. M., Haneychuk V. I., et al.* Evidence for a cosmological oscillation of the nucleus of the Seyfert galaxy NGC 4151 // *Astron. Astrophys. Trans.*—1998.—**16**, N 1.—P. 15—30.
 16. *Lawrence A.* Repeated X-ray flaring in NGC 4151 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1980.—**192**, N 1.—P. 83—94.
 17. *Massaro E., Lorenzetti D., Perola G.C., Spinoglio L.* Variability of near IR flux of OJ 287 // *Adv. Space Res.*—1988.—**8**, N 2-3.—P. 99—102.
 18. *McHardy I.* EXOSAT observations of variability in active galactic nuclei // *Mem. Soc. Astron. Ital.*—1988.—**59**, N 1-2.—P. 239—259.
 19. *Mushotzky R. F., Done C., Pounds K. A.* X-ray spectra and time variability of active galactic nuclei // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*—1993.—**31**.—P. 717—761.
 20. *Scargle J. D.* Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // *Astrophys. J.*—1982.—**263**, N 2.—P. 835—853.
 21. *Scherrer P. H., Wilcox J. M.* Structure of the solar oscillation with period near 160 minutes // *Solar Phys.*—1983.—**82**, N 1/2.—P. 37—42.
 22. *Severny A. B., Kotov V. A., Tsap T. T.* Observations of solar pulsations. // *Nature*.—1976.—**259**, N 5539.—P. 87—89.

Поступила в редакцию 25.09.00