

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 10

АВГУСТ, 1974

ВЫПУСК 3

К ПРОБЛЕМЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ГАЛАКТИЧЕСКИХ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ

П. Р. АМНУЭЛЬ, О. Х. ГУСЕЙНОВ

Поступила 19 ноября 1973

Рассмотрено пространственное распределение и некоторые другие характеристики галактических рентгеновских источников. Показано, что в Галактике может существовать популяция слабых рентгеновских источников со светимостями $\geq 10^{33}$ эрг/сек. Число слабых источников в Галактике может быть $\sim 10^4$. Несколько слабых неотожествленных рентгеновских источников из каталога [1] (с потоками меньше 10 кв/сек в диапазоне 2—6 кэв) могут принадлежать к указанной галактической популяции.

За последние годы значительно возросло число зарегистрированных рентгеновских источников — третий каталог Ухуру [1] содержит координаты 161 объекта. Что касается физической природы этих замечательных образований, то она еще далека от ясности. К августу 1973 г. достаточно уверенными можно было считать лишь 13 отождествлений рентгеновских источников с галактическими объектами: семь источников являются остатками Сверхновых (Краб, Тихо, Cas A, Vela X, Pup A, IC 443 и Cyg Loop), два источника — члены двойных систем (источники Cyg X—1 и Her X—1 отождествлены со звездами HDE 226868 и HZ Her, соответственно), один источник — комплексный в направлении на центр Галактики и два источника отождествлены со звездообразными объектами (Sco X—1 и Cyg X—2), физическая природа которых неясна. С большой степенью вероятности можно полагать также, что источники 3U 0900—40 и 1700—37 также отождествляются с двойными системами.

Уже этот список показывает, что рентгеновские источники неоднородны по физической природе (см. также [2]). Ниже мы попробуем сделать некоторые выводы о свойствах рентгеновских источников, основываясь только на данных каталога [1].

1. *Переменные рентгеновские источники.* В [1] содержится 38 переменных рентгеновских источников, галактическое происхождение которых сомнений не вызывает [3]. Только три источника имеют галактическую широту $|b| > 10^\circ$ (Sco X—1, Her X—1 и Cyg X—2). Источники Sco X—1 и Cyg X—2 относительно близки, поэтому их высокая широта не является необычной. Пекулярным остается источник Her X—1 (см. [4]). С учетом источников Sco X—1 и Her X—1 средняя широта переменных источников $|\bar{b}| = 4,44$, а без учета этих источников $|\bar{b}| = 2,97$.

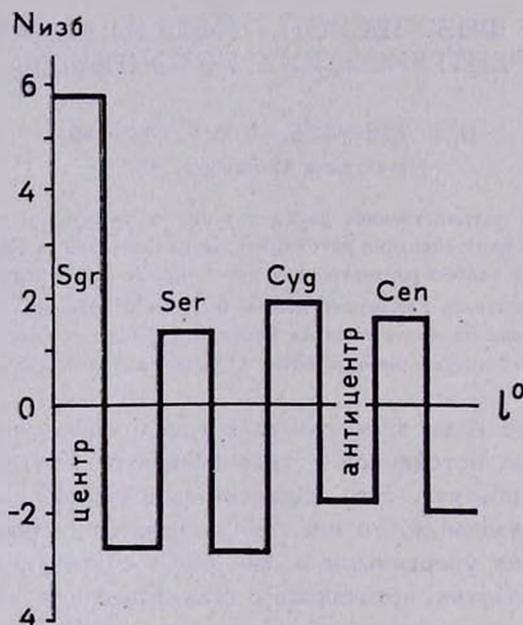


Рис. 1. Распределение переменных рентгеновских источников по галактической долготе. $N_{изб} = N_H - N_p$, где N_H — наблюдаемое число источников, N_p — ожидаемое число при равномерном распределении. Область Sgr включает долготы от 322° до 19° , область Ser — от 30° до 37° , область Cyg — от 68° до 92° , область Cen — от 283° до 304° .

На рис. 1 показано распределение рентгеновских источников в направлениях на галактические рукава, границы рукавов по долготе l взяты в соответствии с [3]. Показана разность между наблюдаемым числом источников N_H и числом N_p , ожидаемым при равномерном распределении 38 источников в галактическом диске. Наблюдается избыточная концентрация источников в направлениях на галактические рукава, но несравненно большее значение имеет концентрация к галакти-

ческому центру (последнее неудивительно, поскольку все типы звездного населения в той или иной степени проявляют концентрацию к центру Галактики). В направлении на центр (область долгот от 322° до 19°) избыток источников равен 6, причем $|\bar{b}| = 2^{\circ}60$. Если источники действительно концентрируются к центру, то расстояние до них от 5 до 10 *кпс* (возможно — и больше). Тогда источники этой группы в основном удалены от плоскости Галактики на расстояние более 200 *пс* (однако наиболее яркие источники расположены ниже). Аналогичный вывод сделан также в [5].

Источники в направлениях на рукава Лебеда и Змеи имеют, соответственно, $|\bar{b}| = 4^{\circ}25$ и $4^{\circ}66$. Если и эти источники имеют $|z|$ в пределах 200—400 *пс*, то расстояние до них 3—6 *кпс*. В направлении на рукав Центавра величина $|\bar{b}|$ значительно меньше: $|\bar{b}| = 0.48$. Возможно, источники в этом направлении в действительности являются более далекими. Вывод этот подтверждается тем, что эти источники и более слабые. Средний поток от переменных источников (в максимуме) в направлении на центр Галактики равен 360 *кв/сек*, в направлениях на рукава Змеи и Лебеда, соответственно, 150 и 500 *кв/сек*, в то время как источники в направлении на рукав Центавра имеют средний поток около 80 *кв/сек*. Расстояние до этой группы источников может быть ~ 10 —15 *кпс* при $|\bar{z}| \sim 150$ *пс*.

Распределение переменных источников свидетельствует о том, что, вероятно, расстояние до них колеблется от 3 до 15 *кпс* при $|z|$ от 100 до 400 *пс*. Аналогичный вывод был сделан нами в [2] на основании отсутствия корреляций рентгеновских источников и галактических объектов плоской составляющей — областей HI и HII, рассеянных скоплений.

Светимости переменных источников в максимуме могут колебаться от $\sim 10^{35}$ *эрг/сек* (Sco X—1) до $\sim 10^{36}$ *эрг/сек* (источники вблизи центра и в направлении на рукав Центавра), см. [3]. Если принять, что средняя светимость переменных источников $\sim 10^{37}$ *эрг/сек*, то информацию о расстоянии можно получить из зависимости $\lg N - \lg F$ (рис. 2), где N — число переменных источников, имеющих потоки более F *кв/сек* (по данным [1]). Функция $\lg N - \lg F$ плоская до потоков ~ 100 *кв/сек*. Существует сильный недостаток переменных источников с потоками больше 100 *кв/сек*. Если светимость $\sim 10^{37}$ *эрг/сек*, то указанный перелом свидетельствует, что большинство переменных источников расположено дальше 4 *кпс*. Зависимость $\lg N - \lg F$, таким образом, косвенно подтверждает сделанный раньше вывод о среднем расстоянии между переменными рентгеновскими источниками [2, 3].

Из сказанного следует также, что в Галактике невелико число источников со светимостями $\sim 10^{36}$ эрг/сек (во всяком случае, нет ожидаемого роста числа источников с уменьшением светимости). В противном случае должны были бы наблюдаться источники типа Sco X—1 с потоками в максимуме ≤ 10 кв/сек, если расстояние до источника больше 12 клс. Однако, согласно [1], нет ни одного переменного источника, поток от которого в максимуме был бы меньше 10 кв/сек. Если светимости источников заключены в интервале $10^{37} - 10^{38}$ эрг/сек, то 38 наблюдаемых переменных источников практически исчерпывают число переменных источников в Галактике.

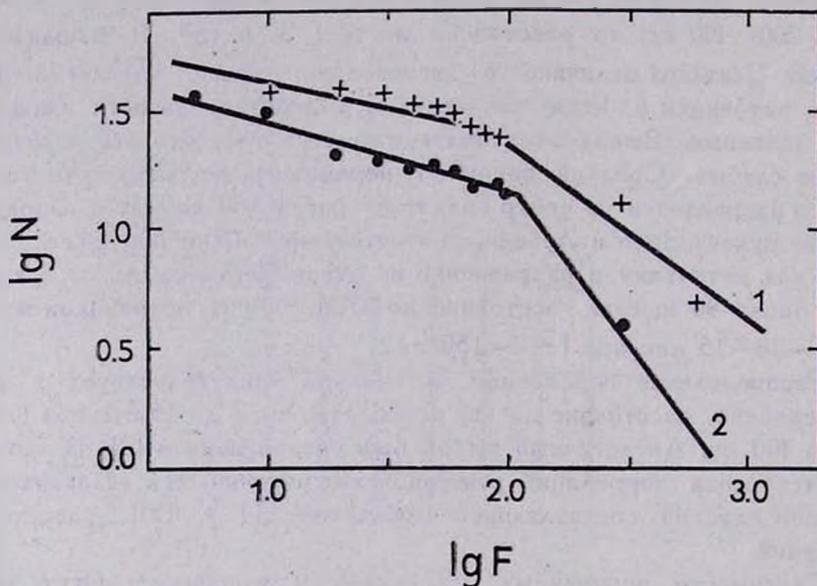


Рис. 2. Зависимость $\lg N$ от $\lg F$ для переменных источников. 1 — блеск в максимуме. 2 — блеск в минимуме.

В [3] отмечается, что большинство переменных галактических источников — двойные системы с перетеканием вещества на релятивистскую звезду. В [4] также делается вывод, что аккреция в двойной системе — единственный эффективный механизм поддержания рентгеновского излучения. Исключение делается лишь для остатков Сверхновых. Это заключение сейчас поддерживается большинством авторов [3, 4, 6, 7].

Пока, однако, не доказана двойственность источников Sco X—1 и Cyg X—2. Кроме того, неясен вопрос, почему не может быть относительно слабой аккреции на релятивистскую звезду, когда ожидаемая све-

тимость $\sim 10^{34}$ эрг/сек или ниже. Аккреция ослабевает при увеличении расстояния между компонентами. В известных двойных рентгеновских источниках это расстояние $\sim 10^{12}$ см (см., например, [8]). Отсутствие сильного роста числа источников при уменьшении светимости тогда может быть объяснено разрывом пары во время вспышки Сверхновой, если расстояние между компонентами $> 10^{12}$ см.

Допустим, что все переменные рентгеновские источники являются двойными системами. Сейчас известны пять галактических рентгеновских источников, двойственность которых несомненна. Четыре из них — затменные. Сколько следует ожидать незатменных источников? В моделях Her X — 1 и Cen X — 3 [8] радиус главной звезды и расстояние до рентгеновского источника — одного порядка. Положим, что расстояние от центра главной звезды до рентгеновского источника равно удвоенному радиусу звезды. Тогда, если рентгеновский источник имеет малые размеры (по сравнению со звездой), следует ожидать один затменный источник на пять незатменных. Если размер источника такой же, как размер главной звезды, то один затменный источник на два незатменных. Поскольку известны четыре затменных источника, то следует ожидать открытия от 8 до 20 незатменных.

Могут ли незатменные источники быть постоянными? Если все переменные источники — затменные, то незатменных должно было бы быть от 70 до 150. Однако наблюдаемое число постоянных галактических источников не больше 22. Постоянные источники либо не являются двойными системами, либо на самом деле не постоянны (более вероятно последнее, см. [9]). Количество ожидаемых незатменных источников согласуется с количеством наблюдаемых переменных источников.

Нужно отметить, что и затменные источники показывают также переменность, с затмением не связанную. Поток от Cyg X—1 монотонно убывает [10]. Источники Cen X—3 и Her X—1 показывают длительные, в несколько десятков суток, изменения потока (не связанные также с 35-дневным циклом в случае Her X—1). Отмечена переменность блеска звезд HD 77581 и HD 153919, отождествляемых соответственно с источниками 3U 0900—40 и 3U 1700—37 [11, 12]. Причиной нестационарности может быть, например, прецессия оси вращения главной звезды. Горячее пятно, возникающее на поверхности главной звезды из-за переизлучения рентгеновского потока, перемещается в результате прецессии по поверхности звезды, создавая сильные перемещения масс в фотосфере.

На рис. 3 показана зависимость амплитуды изменения потока F_{\max}/F_{\min} переменных источников от величины максимума потока F_{\max} . Для сравнения на горизонтальной оси нанесены наиболее яркие посто-

янные источники. Видно наличие двух областей, где нет ни одного переменного источника — нет ярких высокопеременных источников и слабых низкопеременных. По-видимому, реально существует зависимость F_{\max}/F_{\min} от F_{\max} , причем без учета Sco X-1 и Her X-1 эта зависимость имеет вид

$$\lg \frac{F_{\max}}{F_{\min}} = 1.2 - 0.3 \lg F_{\max}. \quad (1)$$

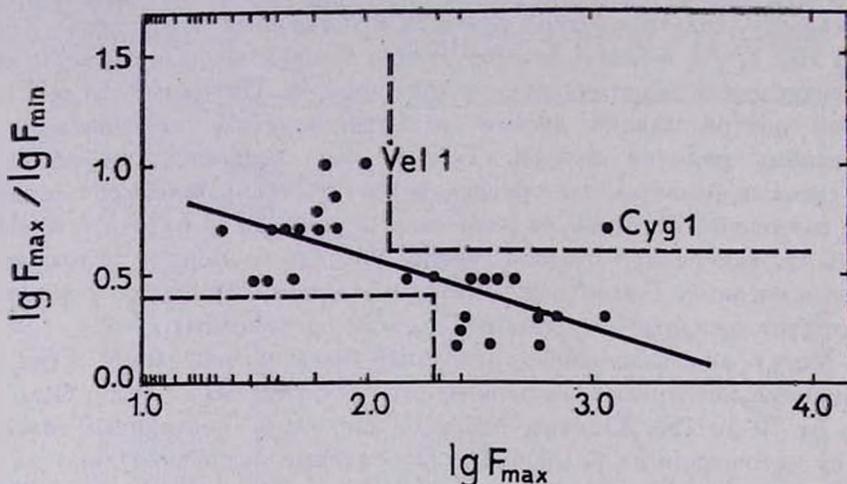


Рис. 3. Зависимость амплитуды изменения потока переменных источников от потока в максимуме.

Практически все известные яркие постоянные источники попадают на рис. 2 в незаполненную нижнюю область. В области больших потоков F_{\max} , где величина F_{\max}/F_{\min} мала, вообще нет постоянных источников.

Существование зависимости (1) означает, что переменные источники с меньшими потоками являются и более слабыми по светимости. В противном случае пришлось бы принять, что величина амплитуды зависит от расстояния до источника, что невероятно. Значительные отклонения от зависимости (1) показывают близкие источники Cyg X-1, Sco X-1. Если постоянные источники при дальнейших исследованиях покажут слабую переменность, то нижняя область на рис. 3 окажется заполненной, и зависимость F_{\max}/F_{\min} от F_{\max} станет более слабой.

На рис. 4 показана зависимость числа переменных источников от величины амплитуды F_{\max}/F_{\min} . Наибольшее количество источников имеет $F_{\max}/F_{\min} \sim 3$. Недостаток источников в области $F_{\max}/F_{\min} \sim 4$

может объясняться неточностью в определении амплитуды в [1]. Несколько источников из областей $F_{\max}/F_{\min} \sim 3$ и $F_{\max}/F_{\min} \sim 5$ могут заполнить указанный завал. Однако недостаток источников в области $F_{\max}/F_{\min} \sim 1-2$ нельзя объяснить лишь неточностью измерений. Монотонное возрастание числа источников при уменьшении F_{\max}/F_{\min} , ожидаемое если физическая природа постоянных и переменных источников одинакова, как видно, не имеет места.

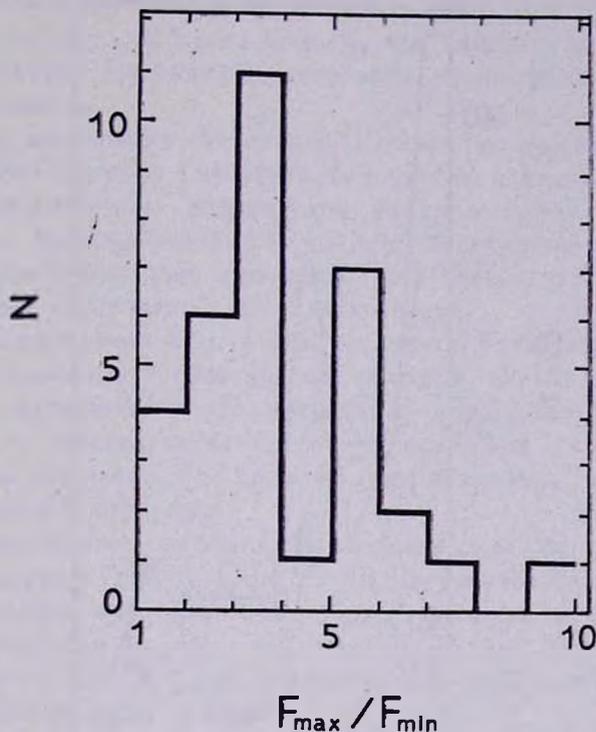


Рис. 4. Зависимость числа переменных источников от величины амплитуды изменения потока.

Уникальность рентгеновских двойных требует каких-то особенностей в характеристиках тех двойных систем, которые уже отождествлены с рентгеновскими источниками. Пока единственной особенностью этих систем является их относительно высокое $|z|$, свидетельствующее, что системы произошли в результате катастрофических процессов и получили скорость, позволявшую им удалиться от галактической плоскости на величину $|z|$, в несколько раз большую, чем $|\bar{z}|$ для обычных звезд классов O и B. Скорость центра масс будет достаточно велика, если в момент вспышки масса взрывающейся звезды окажется больше или такой же, как масса обычной компоненты.

2. *Постоянные рентгеновские источники.* В отличие от переменных постоянные источники наблюдаются во всем диапазоне потоков и на всей площади небесной сферы. Последнее свидетельствует что большая часть этих источников — внегалактические. Разделим постоянные источники на два подкласса: 1 — источники с потоками больше 10 кв/сек , 2 — источники с потоками меньше 10 кв/сек .

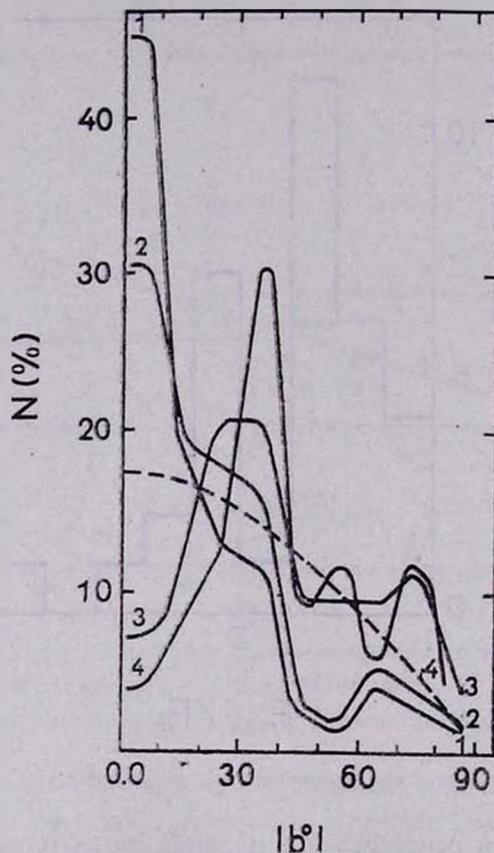


Рис. 5. Распределение постоянных рентгеновских источников по галактической широте. 1 — все неотжествленные постоянные источники, 2 — неотжествленные источники с потоками меньше 10 кв/сек , 3 — отождествленные внегалактические источники, 4 — отождествленные внегалактические источники + неотжествленные источники на галактических широтах больше 30° . Пунктирная линия — равномерное распределение по широтам.

Всего наблюдается 78 неотжествленных постоянных источников. Еще 34 источника более или менее надежно отождествлены с внегалактическими объектами [1]. На рис. 5 показано распределение постоянных источников по галактической широте. Пунктиром показано

однородное распределение по широтам. Сильный избыток неотожествленных источников на низких широтах объясняется влиянием ярких постоянных источников, имеющих галактическое происхождение. Однако и слабые неотожествленные источники не показывают ожидаемого из-за поглощения некоторого дефицита на низких широтах. По-видимому, некоторая часть слабых постоянных источников также может иметь галактическую природу.

Средняя галактическая широта постоянных источников (I подкласс) $\overline{|b|} = 7^{\circ}34'$, то есть в 2.5 раза больше, чем величина $\overline{|b|}$ для переменных источников. Постоянные источники являются более близкими и более слабыми.

Яркие постоянные источники показывают сильную избыточную концентрацию к центру Галактики, недостаток в направлении на антицентр, приблизительно равномерное распределение в остальных направлениях. Распределение по долготе постоянных источников 2-го подкласса приблизительно однородно. Это объясняется тем, что большинство этих источников — внегалактические.

Из рассмотрения по l , b следует, что в Галактике, по-видимому, имеются постоянные источники всех потоков, вплоть до находящихся на пределе чувствительности счетчиков Ухуру (некоторые постоянные источники в действительности могут оказаться переменными [9]). Постоянные источники 2-го подкласса, по-видимому, являются также более слабыми и близкими.

Дополнительную информацию о распределении источников и их принадлежности к Галактике можно получить из зависимости $\lg N - \lg F$. При однородном пространственном распределении источников со случайным разбросом светимостей наклон прямой $\lg N - \lg F$ должен быть около -1.5 [5]. Для галактических источников угловой коэффициент должен быть меньше.

На рис. 6 показана зависимость $\lg N - \lg F$ для постоянных рентгеновских источников разных типов. Все постоянные отождествленные источники 2-го подкласса, являющиеся заведомо внегалактическими, хорошо ложатся на прямую

$$\lg N = 2.12 - 1.35 \lg F. \quad (2)$$

Слабые постоянные источники с широтой $|b| > 30^{\circ}$, галактическая природа которых также весьма сомнительна, дают

$$\lg N = 2.33 - 2.60 \lg F. \quad (3)$$

Полагая, что отождествленные внегалактические источники и неотожествленные источники на $|b| > 30^{\circ}$ суть источники одной природы, получаем для них

$$\lg N = 2.23 - 1.55 \lg F. \quad (4)$$

Зависимости (2) и (4) наглядно показывают, что источники, указанные в [1] как внегалактические, действительно ими являются, и что высокоширотные источники также не принадлежат Галактике.

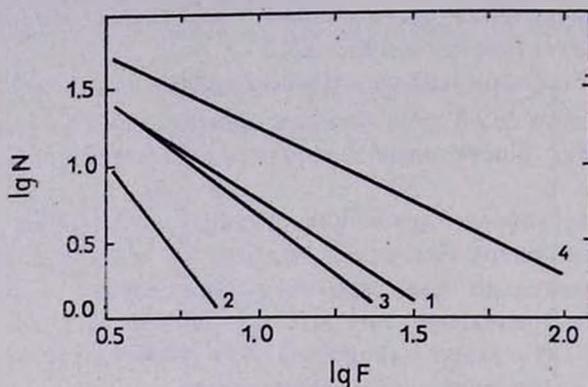


Рис. 6. Зависимость $\lg N$ от $\lg F$ для постоянных рентгеновских источников 1 — неотождественные источники с $|b| < 30^\circ$, 2 — отождественные внегалактические источники, 3 — неотождественные источники с $|b| > 30^\circ$, 4 — отождественные внегалактические + неотождественные с $|b| > 30^\circ$.

С другой стороны, низкоширотные ($|b| < 30^\circ$) неотождественные постоянные источники хорошо ложатся на прямую

$$\lg N = 2.26 - 0.99 \lg F. \quad (5)$$

Величина углового коэффициента свидетельствует о вероятном галактическом происхождении части постоянных неотождественных рентгеновских источников, не только сильных (1 подкласс), но и слабых (2 подкласс).

Наблюдения рентгеновского фона [3, 13] показывают в диапазоне 2—10 кэв избыток на 30% вблизи галактического экватора (в полосе широт $\pm 2^\circ$) [13] и избыток вдвое в направлении на галактический центр [3] по сравнению с направлением на широту 60° [13]. Все это свидетельствует о наличии галактического фона в указанном диапазоне энергий. Полное излучение Галактики, согласно [13], полученное из данных о рентгеновском фоне, $NL \sim 6 \cdot 10^{37}$ эрг/сек. Здесь N — число источников светимости L в Галактике. Из данных о фоне и из распределения слабых источников можно сделать вывод о наличии в Галактике популяции слабых рентгеновских источников (сейчас нам известны практически все источники высокой светимости $\sim 10^{37} - 10^{38}$ эрг/сек, эти источники не дают вклада в фон). Если све-

тимость слабых источников $\sim 10^{33}$ эрг/сек, то число их в Галактике может быть $\sim 6 \cdot 10^4$. С учетом концентрации источников к галактическому центру среднее расстояние до источников в области Солнца около 0.5 клс. Счетчики Ухуру могут фиксировать несколько таких источников (потоки 3—8 кв/сек). Следовательно, около 10% слабых низкоширотных неотожествленных постоянных источников, наблюдавшихся в [1], могут оказаться галактическими. Более естественно считать, что имеется непрерывная функция светимости рентгеновских источников от 10^{33} эрг/сек до 10^{36} эрг/сек. Число источников со светимостью $\sim 10^{33}$ эрг/сек $\sim 10^4$, а со светимостью $\sim 10^{36}$ эрг/сек около 10.

3. *Заключение.* Несмотря на то, что сведения о рентгеновских источниках все более пополняются, особенно с появлением каталога [1], все же природа большинства источников еще неясна. Предварительный анализ позволяет сделать вывод о том, что в Галактике может присутствовать популяция слабых рентгеновских источников, дающих основной вклад в рентгеновский фон в диапазоне 2—10 кэв. Часть слабых постоянных рентгеновских источников (потоки по [1] меньше 10 кв/сек) может быть галактическими, принадлежащими к указанной популяции слабых источников со светимостью $\sim 10^{33}$ — 10^{34} эрг/сек. В Галактике может быть $\sim 10^4$ таких источников. Все источники могут быть переменными и являться двойными системами с перетеканием вещества на релятивистскую звезду. В этом случае, как указывалось в [9], оптическим объектом должна быть скорее всего карликовая звезда класса не ранее F.

Для дальнейшего уточнения физической природы рентгеновских источников нужны отождествления рентгеновских источников с оптическими объектами, а также более надежные данные о спектрах и переменности рентгеновских источников. Необходимы также высокочувствительные обзоры источников в диапазоне ≤ 1 кэв, где можно установить расстояния до источников по завалу в энергетических спектрах.

Шемахинская астрофизическая
обсерватория

ON THE PHYSICAL NATURE OF THE GALACTIC X-RAY SOURCES

P. R. AMNUEL, O. H. GUSEINOV

The spatial distribution and some other characteristics of the galactic X-ray sources are considered. It is shown that a population

of weak X-ray sources with luminosities $\geq 10^{31}$ erg/s may exist in the Galaxy. The number of weak sources in the Galaxy may be $\sim 10^4$. A few weak unidentified X-ray sources of the Catalogue [1] (with fluxes less than 10 cts/s in the region of 2—6 keV) may belong to the indicated galactic population.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. R. Giacconi, S. Murray, H. Gursky, E. Kellogg, E. Schreier, T. Matlsky, D. Koch, H. Tananbaum, Preprint, ASE—3249, 1973.
2. П. Р. Амнуэль, О. Х. Гусейнов, ПЭ, 19, 19, 1973.
3. H. Gursky, Preprint, ASE—3066, 1972.
4. И. С. Шкловский, Астрон. ж., 50, 233, 1973.
5. T. Matlsky, H. Gursky, E. Kellogg, H. Tananbaum, S. Murray, R. Giacconi, Ap. J., 181, 753, 1973.
6. S. Lea, B. Margon, Preprint, 1972.
7. Р. А. Сюняев, В. М. Черепищук, Ю. Н. Ефремов, ПЭ (в печати).
8. J. Arons, Preprint, 1973.
9. P. R. Amnuel, O. H. Guseinov, Sh. Yu. Rakhimov, Astrophys. Space. Sci. (in press).
10. F. Seward, Preprint, UCID—15622, 1970.
11. W. Hiltner, L. Werner, P. Osmer, Ap. J., 175, L19, 1972.
12. S. Heap, Ap. J., 181, L 71, 1973.
13. R. Bleach, E. Boldt, S. Holt, D. Schwartz, P. Serlemitsos, Ap. J., 174, L 101, 1972.