

**ПОИСК ВОЗМОЖНОГО МЕЗОЛИНЗИРОВАНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ. II.
ДВОЙНЫЕ И ТРОЙНЫЕ ВСПЛЕСКИ В КАТАЛОГЕ BATSE.**

О.С. Угольников

Астрокосмический центр Физического ин-та им. П.Н. Лебедева РАН

Поступила в редакцию 04.06.2001 г.

Работа посвящена поиску возможного явления гравитационного линзирования космических гамма-всплесков на телах типа шаровых звездных скоплений (мезолинзирования). В случае подобного явления гамма-всплеск должен иметь кривую блеска с двумя или тремя подобными компонентами, имеющими одинаковые спектры и отстоящими друг от друга на время порядка нескольких секунд. При помощи разработанного статистического метода сравнения компонент в каталоге BATSE за все время работы Космической обсерватории им. Комптона (1991 — 2000 годы) найдено 11 возможно мезолинзированных гамма-всплесков, 2 из которых имеют кривую блеска с тремя компонентами. Исследуется возможность гравитационного линзирования данных гамма-всплесков на телах кинговского типа.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время гипотеза космологического происхождения гамма-всплесков получает все большее подтверждение [1]. Как отмечается во многих работах, крайне весомым аргументом в пользу данной гипотезы стало бы обнаружение гравитационного линзирования гамма-всплесков, какое мы наблюдаем для других типов удаленных объектов — квазаров, активных ядер галактик [2]. Однако наблюдать такое явление достаточно сложно, так как в гамма-области сейчас не существует детекторов с высоким разрешением (до 1" и лучше). С другой стороны, гравитационное линзирование гамма-всплеска могло бы быть замечено по раздвоению его кривой блеска, связанному с разницей времен распространения излучения по различным траекториям.

Настоящая работа является продолжением и дополнением [3], где исследовался вопрос возможного мезолинзирования космических гамма-всплесков, то есть гравитационного линзирования на телах типа шаровых звездных скоплений с массами 10^5 - 10^6 масс Солнца. В этом случае разница времени между моментами регистрации

линзированных изображений составляет несколько секунд, что сравнимо с продолжительностью самого гамма-всплеска, и мы бы зарегистрировали один гамма-всплеск с двумя (или более) подобными компонентами кривой блеска. В работе [3] был произведен поиск среди 485 гамма-всплесков из 4-го каталога BATSE [4], в результате было найдено 6 кандидатов в возможно мезолинзированные всплески.

Однако в [3] фактически велся поиск только одного типа мезолинзирования со свойствами, соответствующими линзированию на точечной массе. Это существенно ограничивало критерии поиска. Кроме этого, набор гамма-всплесков электронной версии каталога BATSE 4 охватывал ограниченную область времени с марта 1993 по август 1996 года. В настоящей работе будет проведен поиск возможно мезолинзированных гамма-всплесков для самых различных случаев. Кроме этого, данный поиск будет проведен и для гамма-всплесков 2-го каталога BATSE, охватывающего период с апреля 1991 до марта 1993 года, а также для гамма-всплесков, зарегистрированных аппаратурой BATSE с августа 1996 до мая 2000 года — окончания работы Космической обсерватории. Включение данных гамма-всплесков увеличивает их количество более чем в три раза.

2. ДАЛЬНЕЕ И БЛИЖНЕЕ МЕЗОЛИНЗИРОВАНИЕ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ: НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ.

В работах [2, 3] подробно рассмотрена схема гравитационного линзирования космического гамма-всплеска на точечной массе. В данных работах показано, что в этом случае наблюдатель, находящийся вблизи продолжения линии “источник — линза”, регистрирует две компоненты гамма-всплеска с подобными (отличающимися лишь фактором константы) кривыми блеска и одинаковыми спектрами. В этом случае также будет выполняться еще одно свойство: более яркий компонент будет зарегистрирован раньше, нежели более слабый. Именно этими критериями и определялся поиск явления гравитационного линзирования для космических гамма-всплесков (данный случай был назван в [3] дальним мезолинзированием). В [3] приводится оценка границы области применимости данного приближения для случая мезолинзирования. Для этой оценки внешний радиус шарового скопления R_{GC} приравнивается к пространственному радиусу Эйнштейна. В результате получается неравенство для расстояния до линзы L_{OL} :

$$L_{OL} \geq \frac{R_{GC}^2}{2R_G} = \frac{R_{GC}^2 c^2}{4GM} \quad (1),$$

где M и R_G — масса и гравитационный радиус шарового скопления, а c — скорость света. Подставляя в (1) значения параметров, типичные для шаровых скоплений нашей Галактики, авторы [3] получают, что приближение точечной линзы справедливо только при расстояниях до нее, не меньших 10^{10} пк, что, в свою очередь, сопоставимо с размерами Вселенной. При меньших расстояниях линзирование уже не будет носить точечный характер, и для его расчета необходимо учитывать внутреннее строение линзы (данный случай назван в [3] ближним мезолинзированием). Вопрос о гравитационном линзировании на шаровом скоплении или карликовой галактике с внутренним распределением массы, соответствующим закону Кинга [6], исследовался в ряде работ [7, 8], и мы воспользуемся результатами данных работ. Закон Кинга определяет зависимость плотности внутри скопления ρ от расстояния до его центра p :

$$\begin{aligned} \rho(p) &= \rho_0 \left(1 + \frac{p^2}{r_c^2}\right)^{-3/2}, & p < r_t, \\ \rho(p) &= 0, & p \geq r_t \end{aligned} \quad (2).$$

Здесь ρ_0 — центральная плотность скопления, r_c — радиус ядра и r_t — внешний радиус скопления. В работах [7, 8] использовалась система параметров, изображенная на рис.1. Расстояние l_S от центра линзы до линии “источник – наблюдатель”, а также прицельный параметр луча l выражаются в единицах радиуса ядра скопления:

$$x = \frac{l}{r_c}, \quad y = \frac{l_S}{r_c} \quad (3).$$

Пространственное положение источника, линзы и наблюдателя определяются параметром g , равным

$$g = \frac{L_{OL} L_{LS}}{L_{OS} F_L} \quad (4).$$

Здесь L_{OL} , L_{LS} и L_{OS} есть расстояния соответственно между наблюдателем и линзой, линзой и источником и наблюдателем и источником, а F_L — фокусное расстояние линзы — параметр, равный

$$F_L = \frac{c^2}{8\pi G \rho_0 r_c} \quad (5)$$

и составляющий для типичных шаровых скоплений десятки МПк [7, 8]. Угол преломления луча δ выражается в единицах угла α_c , под которым радиус ядра скопления r_c виден с расстояния F_L :

$$\delta(x) = \frac{8\pi G\rho_0 r_c^2}{c^2} \alpha(x) = \frac{r_c}{F_L} \alpha(x) = \alpha_c \alpha(x) \quad (6).$$

В этом случае функция $\alpha(x)$ представляется в виде

$$\alpha(x) = \frac{\Lambda(x)}{x},$$

$$\Lambda(x) = \ln(1+x^2) - 4 \frac{\sqrt{1+x^2}-1}{\sqrt{1+x_t^2}} + \frac{x^2}{1+x_t^2}, \quad x \leq x_t,$$

$$\Lambda(x) = \Lambda(x_t), \quad x > x_t \quad (7),$$

где $x_t = r_t/r_c$. Условие попадания луча к наблюдателю в точке О на рис.1 определяется соотношением

$$\alpha(x) = \frac{x-y}{g} \quad (8).$$

Последние две формулы при заданных параметрах линзирования g , y и x_t есть уравнение относительно x , то есть относительно траектории луча. Каждое его решение соответствует одному изображению источника S, видимому в точке О, а количество корней будет равно количеству изображений. Коэффициент усиления каждого изображения определяется формулой:

$$I_i = J_i/J_0 = \left| \frac{x_i}{y} \frac{dx_i}{dy} \right| \quad (9).$$

Здесь J_0 — яркость источника при отсутствии линзирования. Кроме этого, время распространения сигнала по каждой из траекторий будет различным. Этот эффект имеет два составляющих: разную длину траекторий и релятивистское замедление времени в гравитационном поле (эффект Шапиро). Данный вопрос был детально изучен в [7], суммарная временная задержка по сравнению со временем распространения по прямолинейной траектории через центр линзы t_0 составляет

$$t_i - t_0 = \frac{8\pi G\rho_0 r_c^3 (1+z_L)}{c^3} T(x_i) = C_0 T(x_i) \quad (10),$$

где z_L — красное смещение линзы и

$$T(x) = 2x\alpha(x) - 2 \int_0^x \alpha(x') dx' - \frac{x^2}{g} \quad (11),$$

Исследования уравнения (7)-(8) были проведены в [7, 8]. Основным результатом было

обнаружение конической каустики при $y = \pm y_c(g, x_t)$, внутри которой, при меньших значениях $|y|$, количество изображений равнялось трем, что, к примеру, не могло иметь место в случае линзирования на точечной массе. При $y=0$ два из этих трех изображений сливаются в одно, и эта ситуация соответствует осевой каустике. Вне конической каустики, а также перед фокусом линзы наблюдается только одно изображение источника.

Таким образом, количество изображений источника в случае ближнего мезолинзирования составляет 1, 2 или 3. Свойство подобия всех изображений, а также совпадение их спектров в этом случае также сохраняются, однако однозначной связи между яркостью и очередностью регистрации всех изображений уже не будет, тем самым, третье требование к гравитационно линзированным гамма-всплескам, предъявляемое в [2] и [3], в данном случае отпадает. Таким образом, при поиске ближнего мезолинзирования нам нужно выделять все гамма-всплески с двумя или тремя подобными компонентами, имеющими схожие спектры. При этом особое внимание нужно обращать именно на тройные гамма-всплески, сразу по нескольким причинам. Во-первых, двойная кривая блеска имеет место только в вырожденных случаях попадания на каустику или одновременного наблюдения двух компонент, и в первом из этих случаев один из компонент будет значительно ярче второго, который, в свою очередь, может быть пропущен. А во-вторых, вероятность случайного подобия сразу трех компонент гамма-всплеска значительно ниже.

Дальнее мезолинзирование является предельным случаем ближнего при $|x| > x_t$. При этом яркость одного из компонент будет очень малой, а для двух других будут выполняться формулы, записанные в [2, 3] для точечного линзирования. Свойства линзированных гамма-всплесков в этом случае описаны выше.

3. ПОИСК МЕЗОЛИНЗИРОВАННЫХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ.

3.1. Дальнее мезолинзирование.

Процедура поиска космических гамма-всплесков, проявляющих свойства дальнего мезолинзирования, была описана и использована в [3] для 485 гамма-всплесков из электронной версии 4-го каталога BATSE [4]. Ее суть состояла в следующем: сначала выбирались гамма-всплески с визуально похожими двумя компонентами кривой блеска, причем более яркий пик должен был наступать раньше более слабого. Одновременно с этим в нулевом приближении оценивалось отношение яркостей пиков $K = J_1/J_2$ и временной

интервал между ними $\Delta t = t_2 - t_1$. На втором этапе подобие пиков проверялось по критерию χ^2 с уровнем значимости 0.003 и вычислялись уточненные значения K и Δt , как соответствующие минимуму величины χ^2 . Наконец, третьим этапом было сравнение 16-канальных интегральных спектров двух пиков. Из 485 всплесков всем критериям дальнего мезолинзирования удовлетворили 6, описанные в [3].

В настоящей работе поиск по той же методике был проведен для 444 гамма-всплесков из 2-го каталога BATSE [5], а также для 583 гамма-всплесков, произошедших в августе 1996 — июне 2000 года. В результате было найдено еще 5 гамма-всплесков, отвечающие всем признакам дальнего мезолинзирования: GRB 911006, 920113, 920728, 000126A и 000407. На рис.2 показаны их кривые блеска, а в таблице 1 даны параметры всех 11 возможно мезолинзированных гамма-всплесков: обозначение всплеска и триггерный номер BATSE (NB), галактические координаты l и b и ошибка измерения координат $\Delta\epsilon$ в градусах, отношение яркостей компонент K и временной интервал между ними Δt в секундах.

В [3] была получена формула связи отношения яркостей двух компонент и временного интервала между моментами их регистрации. Однако при этом была учтена только задержка за счет разных длин траекторий. Учет эффекта Шапиро приводит к уточненной формуле

$$\Delta t = \frac{2GM(1+z_L)}{c^3} \left[\frac{K-1}{\sqrt{K}} + \ln K \right] \quad (12).$$

Из последнего соотношения в предположении малого красного смещения линзы z_L и точечного линзирования можно оценить массу линзы M . Соответствующие значения для 11 возможно линзированных всплесков приведены в последнем столбце таблицы 1. Видно, что значения масс вполне характерны для шаровых звездных скоплений.

3.2. Ближнее мезолинзирование.

Как уже говорилось выше, в случае ближнего мезолинзирования гамма-всплесков система критериев отбора будет несколько иной. На первом этапе отбирались все гамма-всплески с двумя или тремя визуально похожими компонентами кривой блеска, которые затем проверялись на подобие методом χ^2 с тем же уровнем значимости 0.003. Еще одним тестом было сравнение спектров всех компонент.

Поиск был проведен среди всех 1512 гамма-всплесков, зарегистрированных аппаратурой BATSE за все время работы Космической обсерватории им. Комптона и имеющих надежные кривые блеска с высоким временным разрешением. Любопытно, что

снятие требования очередности яркого и слабого пиков не привело к появлению новых двухпиковых гамма-всплесков — кандидатов в мезолинзирование, у которых слабый пик наблюдался бы ранее яркого. Это в известной мере уменьшает вероятность того, что все 11 отмеченные выше кандидаты, у которых яркий пик наблюдался раньше, имеют подобные компоненты в силу случайных причин, хотя этого нельзя категорически отрицать.

Однако у двух из данных 11 гамма-всплесков был обнаружен третий компонент кривой блеска, прошедший яркостной и спектральный тесты на подобие с двумя другими. Причем, если в первом случае он наблюдался после двух более ярких компонент, то во втором он предшествовал им. Тест на попарное подобие трех компонент прошли гамма-всплески GRB 911006 и 930430B, относящиеся ко 2-му и 4-му каталогам BATSE соответственно. На рис.3 показаны их кривые блеска с отмеченными моментами трех максимумов t_i . Пунктирная линия соответствует вычитаемому уровню фона.

Методом наилучшего χ^2 -согласия с учетом всех трех компонент для данных всплесков были оценены относительные яркости и временные интервалы между моментами регистрации компонент. Обозначим относительную яркость самого сильного (первого) компонента гамма-всплеска GRB 911006 $j_1=1$, тогда параметры других двух компонент этого всплеска:

$$\begin{aligned} j_2 &= J_2/J_1 = 0.404, \\ j_3 &= J_3/J_1 = 0.123, \\ t_2 - t_1 &= 4.736 \text{ с}, \\ t_3 - t_2 &= 6.144 \text{ с} \end{aligned} \quad (13).$$

У гамма-всплеска GRB 930430B первый пик является самым слабым, поэтому правильной обозначить $j_2=1$, и тогда

$$\begin{aligned} j_1 &= J_1/J_2 = 0.221, \\ j_3 &= J_3/J_2 = 0.191, \\ t_2 - t_1 &= 17.088 \text{ с}, \\ t_3 - t_2 &= 45.952 \text{ с} \end{aligned} \quad (14).$$

Так как χ^2 -тест производился сразу по трем пикам, параметры соотношения двух самых ярких пиков несколько отличаются от приведенных в таблице 1.

Исходя из полученных значений параметров тройных всплесков, вполне логично попробовать определить параметры возможного ближнего мезолинзирования, а именно, величины g , u и x_i , представив формулы (7)-(8) как уравнение относительно этих величин. Очевидно, что для решения уравнения нам необходимо знать как минимум три параметра, определяемые только величинами g , u и x_i и корнями уравнения x_i . Так как мы не знаем

яркость всплеска в отсутствии линзы J_0 , данные об отношении яркостей дают нам два независимых параметра (j_2 и j_3 для GRB 911006 и j_1 и j_3 для GRB 930403B).

В формуле для временной задержки (10) фигурируют сразу два неизвестных: C_0 и t_0 , поэтому из временных данных мы можем вывести только один параметр:

$$\Xi = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_2} = \frac{T(x_2) - T(x_1)}{T(x_3) - T(x_2)} \quad (15).$$

Значение этой величины составляет 0.771 для GRB 911006 и 0.372 для GRB 930403B. В итоге мы имеем ровно три независимых параметра из наблюдательных данных и можем провести поиск отвечающей им комбинации величин g , u и x_t .

Поиск производился в следующей области изменения данных величин: g изменялось от фокуса $g_F(x_t) \sim 1$ до 100, u — от 0 до $u_c(g, x_t)$, так как картина симметрична относительно $u=0$, и наконец, x_t изменялось от $10^{0.5}=3.16$ (что меньше, чем значение x_t для всех шаровых скоплений нашей Галактики [9]) до бесконечности. Для обоих гамма-всплесков решения уравнения найдено не было. Нужно отметить, что получившаяся система из 3 уравнений с 3 неизвестными на значительной области изменения параметров была близка к вырождению.

Однако указанный факт еще не отрицает вероятность ближнего мезолинзирования данных двух гамма-всплесков. Он указывает лишь на то, что возможная гравитационная линза не соответствовала в точности модели Кинга. В [8] отмечается, что на яркости отдельных компонент может сказаться микролинзирование на какой-либо из звезд, составляющих скопление, что приведет к увеличению яркости этой компоненты. В частности, решения могли бы существовать при меньшей яркости главных пиков обоих гамма-всплесков.

Учитывая то, что гамма-всплески GRB 911006 и 930403B входили в число кандидатов и в дальнейшем мезолинзирование, а также меньшую вероятность случайного подобия сразу трех компонент гамма-всплеска, мы можем назвать их главными кандидатами в мезолинзированные всплески вообще.

4. ОБСУЖДЕНИЕ, ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Результатом настоящей работы стало более чем трехкратное, по сравнению с [3], расширение множества космических гамма-всплесков, среди которого был проведен поиск явления возможного мезолинзирования. Кроме этого, на всем данном множестве был проведен также поиск тройных гамма-всплесков, которые следует считать основными

кандидатами в ближнее мезолинзирование. Свойства возможного гравитационного линзирования исследовались с учетом эффекта Шапиро.

Результаты поиска вполне можно назвать успешными: из 1512 гамма-всплесков 11 удовлетворяют признакам дальнего мезолинзирования, а два из них имеют и третий слабый пик, прошедший все тесты на подобие с остальными двумя. В обоих случаях гамма-всплеск не может быть “классической” ближней мезолинзой, так как обратная задача с целью определения параметров линзирования в рамках модели Кинга и уравнений, полученных в [7, 8], решений не имела.

Бесспорно, каждый из 11 гамма-всплесков может иметь подобные кривые блеска случайно и не быть гравитационно линзированным. Вопрос о вероятности мезолинзирования одного гамма-всплеска обсуждался в [3], где с учетом большого массового вклада шаровых скоплений и карликовых галактик в массу Вселенной авторы пришли к выводу о возможности действительного гравитационного линзирования нескольких из найденных кандидатов. Заслуживает внимания тот факт, что во всех найденных двойных гамма-всплесках яркий компонент регистрировался раньше слабого, что вряд ли бы все время наблюдалось в случае случайного подобия компонент. Но здесь нельзя не отметить, что в противоположной ситуации первый слабый пик мог просто не вызвать срабатывание триггера BATSE.

В заключение автор хотел бы поблагодарить В.Г. Курта и Б.В. Комберга (АКЦ ФИАН), а также Ю.В. Барышева и Ю.Л. Бухмастову (АИ СПбГУ) за помощь и ряд ценных замечаний. Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 01-02-06247.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Постнов К.А.* Космические гамма-всплески // Успехи Физических Наук. 1999. Т.69. N5. С.545.
2. *Комберг Б.В., Курт В.Г., Кузнецов А.В.* Макролинзирование космических гамма-всплесков в 4 каталоге BATSE // Астрономический журнал. 1999. Т.76. N9. С.580.
3. *Курт В.Г., Угольников О.С.* Поиск возможного мезолинзирования космических гамма-всплесков // Космические исследования. 2000. Т.38. N3. С.227.
4. *Paciesas W.S. et al.* The Fourth BATSE Burst Catalog (CDROM) // GOSSC, GSFC, NASA, 1997.
5. *Fishman G.J. et al.* The Second BATSE Burst Catalog (CDROM) // GOSSC, GSFC, NASA, 1995.
6. *King I.R.* The Structure of Star Clusters. I. An Empirical Density Law // Astronomical Journal. 1962. V.67. P.471.
7. *Yakovlev D.G., Mitrofanov I.G., Levshakov S.A., Varshalovich D.A.* Effects of Spherically-symmetric Gravitational Lenses Produced by Galaxies and Clusters // Astrophysics And Space Science. 1983. V.91. P.133.
8. *Барышев Ю.В., Езова Ю.Л.* Гравитационное мезолинзирование объектами кинговского типа и ассоциации квазар-галактика // Астрономический журнал. 1997. Т.74. N4. С.497.
9. "Structure and Dynamics of Globular Clusters", edited by *Djorgovski S.G., Meylan G.* // San Francisco. Astron. Soc. of the Pacific. 1993. P. 325.

**THE SEARCH OF POSSIBLE MESOLENSING
OF COSMIC GAMMA-RAY BURSTS. II.
DOUBLE AND TRIPLE BURSTS IN BATSE CATALOG.**

O.S. Ougolnikov

*Astro-Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,
Profsoyuznaya ul. 84/32, Moscow, 117810, Russia*

The work is devoted to the search for possible event of gravitational lensing of cosmic gamma-ray bursts on bodies like globular stellar clusters (mesolensing). In this case the gamma-ray burst would have lightcurve with two or three similar components with the same spectra and coming at the time like some seconds one after another. By means of developed statistic method of components comparison we had found 11 possibly mesolensed gamma-ray bursts in BATSE catalog. 2 bursts of them have the lightcurves with three similar components. The possibility of gravitational lensing of these bursts on King-type bodies had investigated.

Всплеск	NB	l	b	$\Delta\epsilon$	K	Δt	M
		°	°	°		c	M_0
911006	871	266.7	-65.5	2.3	2.498	4.560	$2.5 \cdot 10^5$
920113	1297	139.9	+23.1	5.6	1.447	4.544	$6.2 \cdot 10^5$
920728	1729	76.6	-15.4	2.6	4.854	9.328	$2.8 \cdot 10^5$
930430B	2322	68.8	-52.4	4.0	4.850	45.952	$1.4 \cdot 10^6$
930602	2367	62.5	+31.0	2.5	8.986	9.696	$2.0 \cdot 10^5$
931008C	2569	353.9	-15.7	4.5	1.571	7.744	$8.7 \cdot 10^5$
960601	5483	119.8	+2.1	3.9	1.890	1.120	$8.8 \cdot 10^4$
960615C	5499	330.2	-29.7	7.5	1.450	0.432	$5.9 \cdot 10^4$
960617B	5504	273.6	+24.9	2.5	4.562	3.920	$1.2 \cdot 10^5$
000126A	7968	111.8	-26.3	4.5	1.101	11.968	$6.3 \cdot 10^6$
000407	8066	291.5	-10.4	2.2	2.119	1.952	$1.3 \cdot 10^5$

Таблица 1. Параметры возможно мезолинзированных гамма-всплесков.

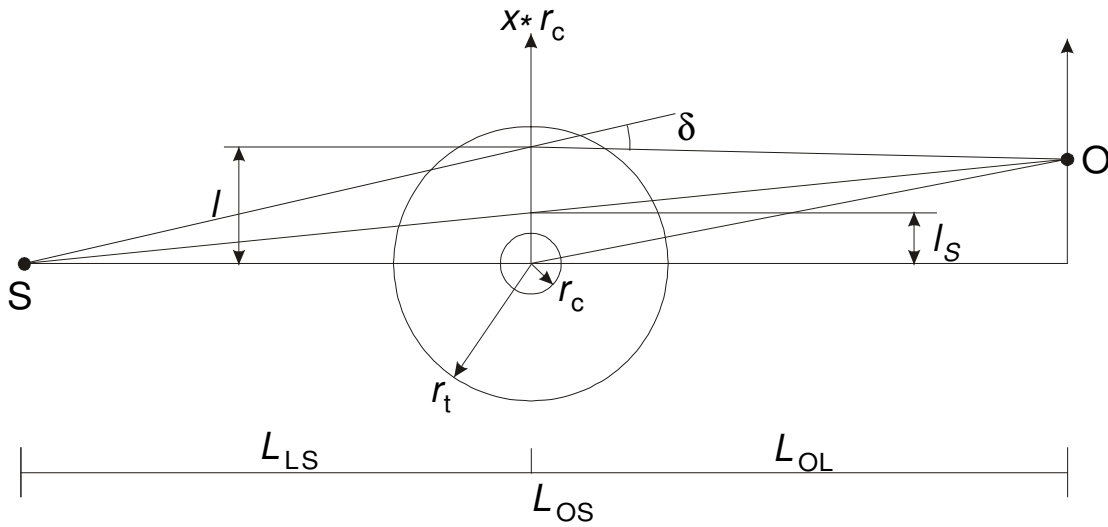
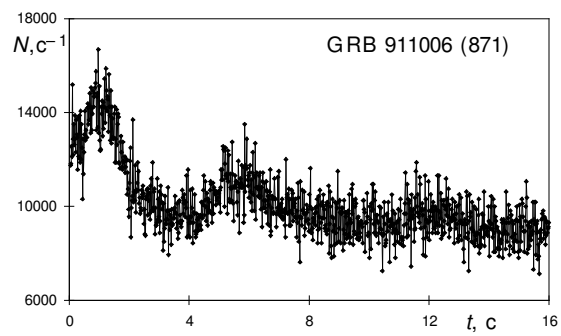
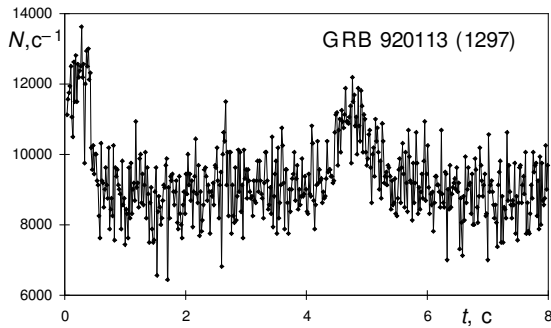


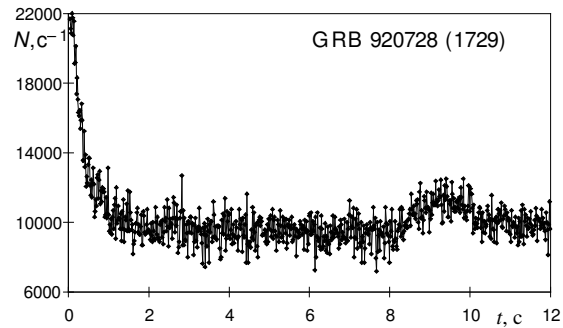
Рисунок 1. Гравитационное линзирование на теле типа шарового звездного скопления.



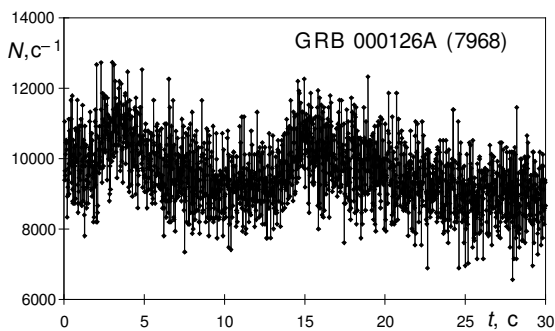
1



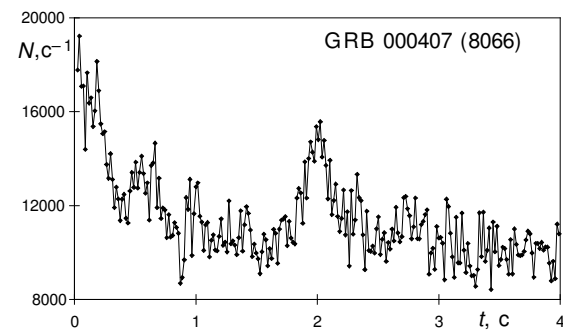
2



3

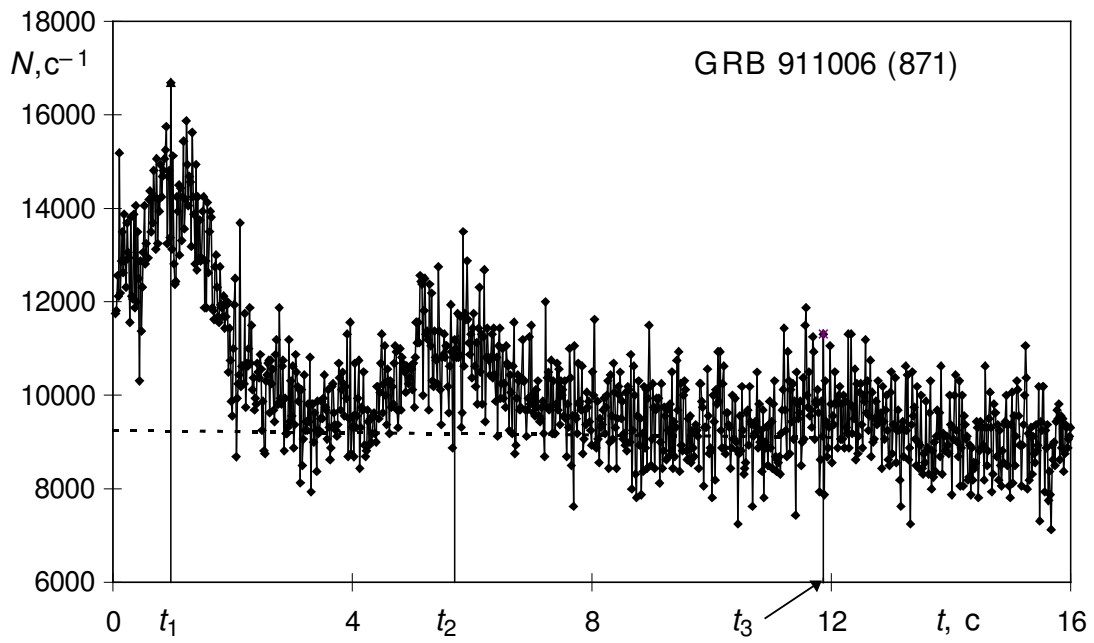


4

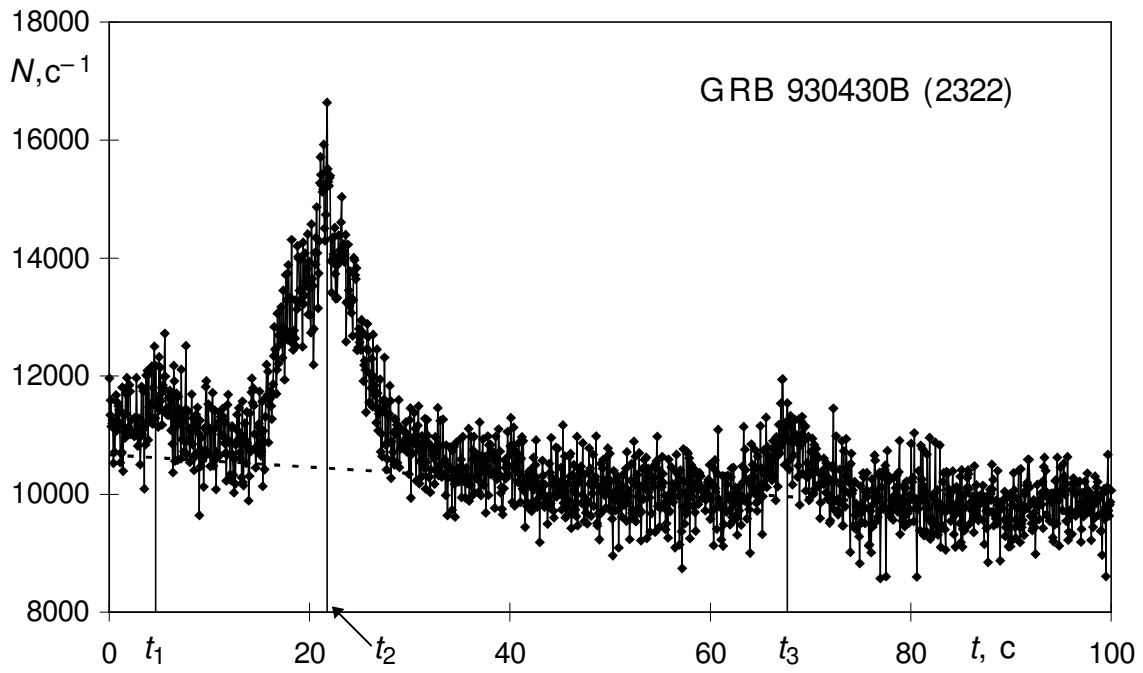


5

Рисунок 2. Кривые блеска возможно мезолинзированных гамма-всплесков в период с апреля 1991 до марта 1993 года и с августа 1996 до мая 2000 года.



1



2

Рисунок 3. Кривые блеска гамма-всплесков GRB 911006 и GRB 930430B с тремя подобными компонентами.