

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Физический факультет
Кафедра физики частиц и космологии

Затмение гамма-источника

Курсовая работа

Автор: Котельников Егор Александрович

Группа: 218

Научные руководители:

Рубцов Григорий Игоревич,

Троицкий Сергей Вадимович

14 мая 2013 г.

Введение

Затмения небесных тел являются хорошим инструментом для изучения явлений, с трудом наблюдаемых обычными методами. Например, солнечные затмения позволяют изучить корону светила, покрытие звёзд Луной – определить их угловой размер, даже если он меньше разрешающей способности телескопа. Подобная идея определения точных размеров при покрытии ярких космических объектов непрозрачным телом может быть применена для определения угловых размеров дальних космических объектов. Особенный интерес с запуском космического спутника Fermi представляют наблюдения в гамма-лучах высокой энергии (>100 МэВ).

Для определения угловых размеров гамма источника может быть использован метод, давно применяемый для определения размеров звёзд, при котором размер звезды определяется по изменению интенсивности во время покрытия его Луной. Интерес представляет возможное существование и размер гало вокруг гамма-источников. К счастью, один из самых ярких источников, квазар 3C 279 расположен вблизи плоскости эклиптики и его солнечное затмение мы можем наблюдать ежегодно 8 октября.

Анализ этого явления был ранее сделан в работах [1] и [2], в которой использовались данные спутника EGRET, направленного на объект во время затмения в 1991 году. Несмотря на значительные усилия, не удалось с достаточной достоверностью зафиксировать изменение потока от источника во время прохождения за солнечным диском. Тем не менее, некоторые события (фотоны) во время затмения были зафиксированы и ожидается, что с запуском нового спутника Fermi станет возможным не только ответить на вопрос о существовании гало, но и поставить некоторые наблюдательные ограничения на его размеры. Инструмент, установленный на спутнике Fermi, значительно превосходит своего предшественника, космический спутник EGRET, по многим характеристикам, некоторые из которых приведены в табл. 1.

Стоит отметить, что в работах [1] и [2] использовались устаревшие теперь сведения об излучении самого Солнца в данном диапазоне: теоретическая модель, описанная в работе [3] и результаты анализа наблюдений EGRET [4], которые предсказывали значительно меньший поток излучения от Солнца, по сравнению с удалёнными объектами, не подтвердилась результатами более детальных исследований. Последние на тот момент данные об интенсивности Солнца приведены в работе [4], где были обработаны данные наблюдений EGRET за 1991-1995 годы, и поставлен лишь верхний предел интенсивности, равный $(2.0) \times 10^{-7} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Повторный анализ данных EGRET с учётом окружающих Солнце ярких источников и изменённой моделью солнечного излучения, показал [5], что поток равен $(1.8 \pm 1.1) \times 10^{-7} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ от диска Солнца и $(3.8 \pm 2.1) \times 10^{-7} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для гало вокруг звезды ($<10^\circ$). Последние результаты наблюдений с использованием данных Fermi за первые 18 месяцев показывают, что интегральный поток (>100 МэВ) от солнечного диска равен $(4.6_{-1.0}^{+1.2}) \times 10^{-7} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, [7], что примерно в 7 раз больше значения, которое использовалось в [1]. Это значение по порядку величины совпадает со светимостью сильно переменного источни-

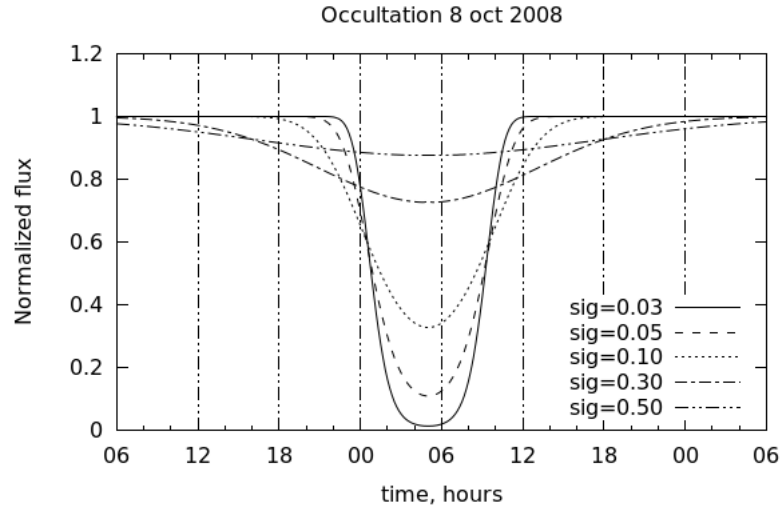


Рис. 1: Зависимость нормализованного потока от гауссова источника с характерным размером σ от времени (в часах, 8 октября 2008 года)

ка 3С 279, затмение которого предполагается анализировать в данной работе. Учитывая приведённые результаты становится ясно, что необходимо учитывать фотоны, пришедшие от Солнца, что потребует значительно более сложной обработки данных, чем при обычной модели затмения квазара абсолютно тёмным телом. Кратко эти методы будут рассмотрены ниже.

Характерная область и длительность наблюдения

Угловой размер Солнца изменяется от 0.525° до 0.560° с изменением орбитального положения Земли и равен 0.533° в период затмений. Минимальное расстояние между центром Солнца с центром источника равно 20° . Время, в течение которого квазар находится за солнечным диском, равно 8,5 часам. Если предположить, что квазар, кроме активного центра, имеет вокруг себя протяжённое изображение, интенсивность которого имеет гауссово распределение относительно центра, то зависимость нормированного потока от времени будет иметь вид, показанный на рис. 1. Различные линии соответствуют разным значениям параметра σ . Сам квазар является достаточно сильно переменным источником. Но сокрытие центра квазара Солнцем может предоставить возможность “увидеть” протяжённое изображение вокруг квазара.

Для определения времени начала и окончания затмений были использованы солнечные эфемериды [8], в которых указано расстояние от геоцентра в каждый момент времени, что делает возможным определить точный угловой размер Солнца. При расчётах использовалось значение диаметра звезды, равное 1392684 ± 130 км, полученное при анализе наблюдений транзита Меркурия в 2003, 2006 годах [9]. Полученные значения моментов сокрытия центра источника от наблюдателя, находящегося в геоцентре, поверхностью светила приведены в табл. 2. Точные моменты начала и окончания сокрытия центра источника от

спутника может отличаться примерно на 5 минут в одну или другую сторону, в зависимости от орбитального положения спутника, которое пока не учитывалось. Несмотря на небольшую погрешность (в сравнении с общей продолжительностью затмения -8,5 часов) эта неточность может значительно повлиять на результаты анализа вследствие небольшого количества регистрируемых событий, которое составляет от 1 до 5 событий за все 8 часов.

Из-за малого числа событий для обработки и низкой точности определения направления фотонов (широкой PSF –point-spread function) детектора для анализа данных наблюдений необходимы некоторые статистические методы. Достаточно подробно метод анализа правдоподобия описан в работе [10]. Ниже кратко будет описан основной принцип, который используется при сопоставлении данных наблюдения с предполагаемой моделью источников.

Основной принцип анализа данных

Участок неба, на котором ведётся наблюдение, разбивается на участки равной площади. Таким образом, результатом наблюдения является таблица, где каждому малому участку области соответствует некоторое число фотонов, пришедших за время наблюдения. Далее программными методами определяется, какая модель соответствует результатам наблюдения. Модель подразумевает под собой список нескольких источников с заданными координатами; интенсивность излучения и характеристики спектров являются “плавающими” параметрами, определяемыми в процессе вычисления. Показателем соответствия модели данным наблюдения является число (the likelihood), вычисляемое по следующей формуле:

$$L = \prod_{ij} p_{ij}$$

где

$$p_{ij} = \frac{\theta_{ij}^{n_{ij}} e^{-\theta_{ij}}}{n_{ij}!}$$

есть вероятность наблюдать n_{ij} событий в пикселе ij , когда ожидаемое число событий (с учетом PSF детектора) будет θ_{ij} . Предполагается, что распределение вероятности подчиняется статистике Пуассона. Проще всего вычисляется $\log L$:

$$\log L = \sum_{ij} n_{ij} \ln \theta_{ij} - \sum_{ij} \theta_{ij} - \sum \ln n_{ij}!$$

Так как последнее слагаемое постоянно, оно не влияет на результат определения наиболее подходящей модели. Таким образом, получаем

$$\log L = \sum_{ij} n_{ij} \ln \theta_{ij} - \sum_{ij} \theta_{ij}$$

Это число выражает правдоподобность того, что предполагаемая модель соответствует полученным данным.

Анализ данных Fermi

Широкий угол обзора телескопа Fermi LAT позволяет наблюдать небо в "обзорном" (survey) режиме без фокусировки на каком-либо конкретном участке неба. При этом каждая точка небесной сферы попадает в поле зрения телескопа каждые 3 часа, то есть за 2 орбитальных периода спутника. Эта особенность наблюдений позволила получить данные наблюдений всех пяти затмений, прошедших с момента запуска спутника на орбиту в июне 2008 года.

При анализе данных использовался набор программ Fermi-Lat Science Tools¹. Полный текст сценариев с указанием параметров, которые были использованы при анализе, приведён в прил. . В процессе обработки исходных данных применялись рекомендуемые в документации параметры для отсеивания лишних событий: диапазон допустимых энергий 100 МэВ – 300 ГэВ, zenith angle=100°. Последний параметр обеспечивает отсеивание фотонов, пришедших под малым углом к горизонту Земли. В модели, которая использовалась для анализа данных, учтены источники в радиусе 20°, а также галактический и изотропный фоны, предоставленные Fermi FSSC и актуальные на момент вычислений.

Сопоставление модели с наблюдательными данными проводилось с помощью программы glike, результат выполнения которой состоит в значениях потоков (в см⁻²с⁻¹) от каждого источника за время наблюдения. Результат вычислений программы для различных промежутков времени приведён в табл. 3, в которой представлены средние потоки, которые приписываются источнику за неделю до затмения, за две окрестные недели (включая затмение), за время затмения (8,5 часов) и за неделю после. Программа glike предоставляет пользователю возможность выбора алгоритмов оптимизации (minuit, newminuit и др.). Значения потоков, вычисленные с разными алгоритмами, различаются мало в сравнении с погрешностью, результаты оценки которой могут при этом различаться в 2 раза. В таблице приведены значения максимальной погрешности (при использовании алгоритма newminuit).

Обсуждение результатов вычислений потока от источника

Значения, представленные в таблице, показывают, что говорить о заметном спаде интенсивности квазара приходится только по результатам первых двух лет. В остальные года заметного спада по сравнению со средней светимостью за соответствующий промежуток времени не происходит.

Среди возможных причин повышенной светимости источника во время затмения было проверено наличие солнечных вспышек во время измерения. Но вблизи всех пяти затмений произошла только одна значительная вспышка 7 октября 2012 года за 4 часа до начала затмения. В остальные годы активность Солнца около затмений не проявлялась.

¹<http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc>

Другие методы определения гало

Солнечное затмение источника не является единственно возможным методом определения существования гало вокруг источника и его размеров. Обсуждение этих методов необходимо, если учесть указанные во введении сложности, возникающие от необходимости брать в расчет поток от Солнца во время затмения. Сохранив при этом основную идею основного метода – сокрытие центрального источника и наблюдение окружающего его изображения можно наблюдать за источником во время лунных и земных затмений. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, которые кратко будут обсуждены ниже.

Техника земного покрытия применяется для определения спектров гамма-источников в диапазоне энергий от 10 до 1000 КэВ. При этом используется инструмент GBM (gamma-burst monitor), установленный на спутнике Fermi и работающий в указанном диапазоне. Наблюдение в более высоких энергиях затруднительно из-за свечения земной атмосферы. Влияние атмосферы настолько существенно, что при анализе данных Fermi LAT обычно выбрасываются все фотоны, направление которых с радиус-вектором из центра земли составляет угол более 100° . Но в более низком диапазоне наблюдения ведутся 14 детекторами, которые покрывают всё поле зрения телескопа. Это позволяет получать данные во время начала и окончания покрытия объектов Землёй. В работе [11] описана техника обработки данных и приведены результаты анализа данных за последние 3 года работы спутника.

Кроме очевидного недостатка – низкой точности определения потоков, этот метод имеет значительное преимущество по количеству используемых данных. Если учесть, что период обращения спутника равен 1,5 часам, то есть 16 об/сут, то за три года непрерывных наблюдения для анализа будут использованы около 15 тыс. "восходов" и "закатов" источника на земном горизонте. Несомненно, такое количество данных может увеличить достоверность статистической обработки.

Период прецессии лунной орбиты равен 18,5 годам, затмение источника длится около полутора часов при наблюдении из геоцентра. Столь малый промежуток времени наблюдения компенсируется, опять же, количеством затмений, которых в течение года произойдет два и упрощением модели непрозрачного тела. Из-за отсутствия магнитного поля у Луны в гамма-лучах отсутствует гало, в то время как у солнца его размер превосходит 15° . В остальном механизмы излучения Луны и Солнца совпадают. Из-за малой продолжительности затмения, скорее всего, возникнет необходимость наблюдения в фокусированном режиме спутника. Ближайшее покрытие источника произойдет 1 июня 2015 года.

Результаты и выводы

В начале данного исследования предполагалось повторить исследование 2007 года [1], но анализ более поздних работ указал на некорректность используемого метода (имеется в виду ненулевой поток от солнечного диска). Таким образом, приведённые результаты являются лишь предварительными оценками.

	GLAST	EGRET
Диапазон энергии	20 МэВ – 300 ГэВ	20 МэВ – 30 ГэВ
Максимальная эффективная площадь	8000 cm^2	1500 cm^2
Угол зрения	> 2 ср	0.5 ср
Угловое разрешение	<3.5° (100 МэВ) 0.15° (> 10 ГэВ)	5.8° (100 МэВ)
Разрешение по энергии	<10%	10%
"Мёртвое время" при событии	<100 мкс	100 мкс
Точность определения источника	<0.5'	15'

Таблица 1: Характеристики GLAST и EGRET

Начало	Окончание
2008-10-08 00:42	10-08-2008 09:15
2009-10-08 06:47	2009-10-08 15:20
2010-10-08 12:54	2010-10-08 21:27
2011-10-08 19:07	2011-10-09 03:41
2012-10-08 01:20	2012-10-08 09:53

Таблица 2: Времена исследуемых затмений

ми, которые не дают окончательного ответа на поставленный в работе вопрос о существовании и размере гало. Для получения окончательного результата необходимо применить более сложные методы обработки, в которых будет учтено влияние Солнца. Так как программы для анализа подвижных объектов не предоставляются в Fermi ScienceTools, необходимо самостоятельно разработать и реализовать необходимый анализ.

Подобное исследование уже проводилось при определении потока Солнца и описано в работах [5] и [7]. Несмотря на согласующиеся результаты этих исследований, методы, применяемые в данных работах, как и исходные данные (в первой анализировались данные EGRET, в последней - Fermi LAT), различны. Кратко эти способы можно описать следующим образом В первой работе определялось соответствие потока излучения Солнца некоторой теоретической модели, которая была значительно изменена со времени последнего измерения в 1996 году [4] и теперь учитывала обратное комптоновское рассеяние в области вокруг солнечного диска. В работе 2011 года проведено экспериментальное определение распределение интенсивности излучения в зависимости от расстояния до солнечного диска и спектра излучения. Подобный способ стал возможен, так как количество данных, полученным спутником Fermi, значительно превышает соответствующие данные EGRET. Использовать результаты этого исследования в настоящем исследовании может быть некорректным из-за предполагаемой сильной зависимости интенсивности солнечного излучения от фазы активности. Поэтому необходимо для каждого затмения проводить отдельный анализ с учётом света от Солнца.

Потоки за различные промежутки времени			
Начало	Окончание	Поток, $\times 10^{-7} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	Ошибка, $\times 10^{-7} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$
2008-10-01 00:00:00	2008-10-08 00:00:00	3.60	0.15
2008-10-01 00:00:00	2008-10-16 23:59:59	4.20	0.51
2008-10-08 00:42:39	2008-10-08 09:15:19	0.56	0.02
2008-10-08 10:00:00	2008-10-16 23:59:59	3.68	0.55
2009-10-01 00:00:00	2009-10-08 06:00:00	8.54	0.04
2009-10-01 00:00:00	2009-10-16 23:59:59	8.53	0.36
2009-10-08 06:47:17	2009-10-08 15:20:54	2.94	0.62
2009-10-08 16:00:00	2009-10-16 23:59:59	8.34	0.13
2010-10-01 00:00:00	2010-10-08 12:00:00	8.06	0.40
2010-10-01 00:00:00	2010-10-16 23:59:59	6.46	0.77
2010-10-08 12:54:59	2010-10-08 21:27:43	5.90	0.96
2010-10-08 22:00:00	2010-10-16 23:59:59	3.97	0.92
2011-10-01 00:00:00	2011-10-08 19:00:00	2.44	0.06
2011-10-01 00:00:00	2011-10-16 23:59:59	2.73	0.05
2011-10-08 19:07:41	2011-10-09 03:41:46	2.73	0.21
2011-10-09 04:00:00	2011-10-16 23:59:59	2.84	0.15
2012-10-01 00:00:00	2012-10-08 01:00:00	4.63	0.19
2012-10-01 00:00:00	2012-10-16 23:59:59	3.48	0.03
2012-10-08 01:20:14	2012-10-08 09:53:05	4.82	0.89
2012-10-08 10:00:00	2012-10-16 23:59:59	2.19	0.42

Таблица 3: Результат вычислений программы glike

Тексты сценариев и параметров используемых при анализе данных

```
#!/bin/sh

#This is the script for hour-by-hour flux calculation
model="/home/egor/FermiTools/model/model"
outputFile="results-gtlike-short"

if [ $# -eq "0" ]
  then echo "Usage [start time (MET)] [stop time (MET)] [output file name]";
  exit;
else
  start=$1; stop=$2;
  if [ $# -gt '2' ]; then outputFile=$3; fi
fi

>outputFile
echo "The results of flux calculations will be written here" > "$outputFile"
  echo "start=$start  stop=$stop"

#параметры для вызова функций
gtselectParams="outfile=3C279_region_filtered.fits ra=194.047 dec=-5.78931
rad=29 tmin=$start tmax=$stop emin=100 emax=300000 zmax=100
*PH00.fits"
filterExpression="(DATA_QUAL==1)&&(LAT_CONFIG==1)&&ABS(ROCK_ANGLE)<52"
gtmkttimeParams="*SC00.fits $filterExpression yes 3C279_region_filtered.fits
3C279_region_filtered_gti.fits"
gtltcubeParams="zmax=100 3C279_region_filtered_gti.fits *SC00.fits
ltCube.fits 0.025 1"
gtexpmapParams="3C279_region_filtered_gti.fits *SC00.fits ltCube.fits
expMap.fits P7SOURCE_V6 30 120 120 35"

spacecraft='ls | grep *SC00.fits'
gtlikeParams="sfile=3C279_output_model.xml statistic=UNBINNED
scfile=$spacecraft evfile=3C279_region_filtered_gti.fits
expmap=expMap.fits expcube=ltCube.fits srcmdl=$model
irfs=P7SOURCE_V6 optimizer=NEWMINUIT"

echo "gtselect..."
START='date -u +%s'
gtselect $gtselectParams #1> /dev/null
FIN='date -u +%s'
date -d "@$((FIN-$START))" +"%M min %S sec..."
echo ""

echo "gtmkttime..."
```

```

START='date -u +%s'
gtmtime $gtmtimeParams #> /dev/null
FIN='date -u +%s'
date -d "@$((\$FIN-\$START))" +"%M min %S sec..."
echo ""

echo "gtltcube..."
START='date -u +%s'
gtltcube $gtltcubeParams #> /dev/null
FIN='date -u +%s'
date -d "@$((\$FIN-\$START))" +"%M min %S sec..."
echo ""

echo "gtexpmap..."
START='date -u +%s'
gtexpmap $gtexpmapParams #> /dev/null
FIN='date -u +%s'
date -d "@$((\$FIN-\$START))" +"%M min %S sec..."
echo ""

echo "gtlike..."
START='date -u +%s'
>tempFile
gtlike $gtlikeParams > tempFile;
FIN='date -u +%s'
date -d "@$((\$FIN-\$START))" +"%M min %S sec..."
echo ""

startDateReadable='echo $start | ~/FermiTools/scripts/met2gmt';
stopDateReadable='echo $stop | ~/FermiTools/scripts/met2gmt';
echo "$outputFile"
echo "start: $startDateReadable ($start), \
      end: $stopDateReadable ($stop):" >> "$outputFile"
cat tempFile >> "$outputFile"
echo "All gtlike results are being saved in file $outputFile"
exit 0

```

Литература

- [1] M. Fairbairn, T. Rashba and S. Troitsky, *Gamma-ray halo around 3C 279: looking through the Sun on the 8th of October*, [Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 403:L6-L10, 2010]
- [2] M. Fairbairn, T. Rashba and S. Troitsky, 2007, Physical Review Letters, 98, 201801
- [3] D. Seckel, T. Stanev and T. K. Gaisser, 1991, ApJ, 382,652 *Signatures of Cosmic Ray Interactions on the Solar Surface*
- [4] Thompson, D. J., Bertsch, D. L., Morris, D. J., and Mukherjee, R. 1997, *Energetic gamma ray experiment telescope high-energy gamma ray observations of the Moon and quiet Sun* [J. Geophys. Res., 102, 14735]
- [5] Orlando, E., Strong, A.W., *Gamma-ray emission from the solar halo and disk: a study with EGRET data*, arXiv: 0801.2178v2
- [6] N. Gehrels, J.E. McEnery, J.D. Myers, and S. Ritz, october, 2007
http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/library/support/Sci_Fact_Sheet.pdf
- [7] Abdo et al, april 2011, *Observations of Two Gamma-Ray Emission Components from the Quiescent Sun*
- [8] The Institut de Mecanique Celeste et de Calcul des Ephemerides (IMCCE), *General ephemerides of the solar system bodies*
http://www.imcce.fr/en/ephemerides/formulaire/form_ephepos.php
- [9] Emilio, M., Kuhn, J.R., Bush, R.I.& Schooll, I.F., *Measuring the Solar Radius From Space During the 2003 and 2006 Mercury Transits*, arXiv: 1203.4898
- [10] Mattox, J.R. et al *The Likelihood Analysis of EGRET Data* [the Astrophysical Journal, 461:396-407, 1996]
- [11] Jenke, P. et al *Three years of Fermi GBM Earth Occultation Monitoring: Observations of Hard X-ray/Soft Gamma-Ray Sources*, apr 2013, arXiv 1304.1825