

УДК 524.7

Особенности гамма-излучения активных ядер галактик

Ю.И. Нешпор

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный
neshpor@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 26 ноября 2010 г.

Аннотация. Показано, что светимость гамма-излучения активных ядер галактик растет с увеличением расстояния до объекта. Величина поглощения гамма-квантов сверхвысоких энергий значительно меньше значений, публикуемых в литературе. Во время повышенного излучения галактики частицы высоких энергий ускоряются более эффективно.

SOME FEATURES OF GAMMA-RADIATION OF ACTIVE GALAXY NUCLEI, *by Yu.I. Neshpor.*
The gamma-ray luminosity of active galaxy nuclei grows with the increase of distance to the object. The value of absorption of the very high energy gamma-quantum is far less than the values, published in literature. During the increased radiation of the galaxy high energy particles are accelerated more effectively.

Ключевые слова: гамма-излучение, активные ядра галактик

1 Введение

В настоящее время у специалистов по космическим лучам резко возрос интерес к активным ядрам галактик (АЯГ). На спутнике GRO COMPTON обнаружено, что многие источники гамма-квантов высоких энергий (ВЭ; $\gamma > 100$ МэВ) отождествляются с АЯГ (Томпсон и др., 1995). В начале 90-х годов от АЯГ было зарегистрировано гамма-излучение сверхвысоких энергий (СВЭ; $E > 10^{11}$ эВ) на наземных детекторах – гамма-телескопах второго поколения. К настоящему времени зарегистрировано более 20 объектов АЯГ, излучающих гамма-кванты СВЭ (Хормс, 2008; Викс, 2008). Нестационарность ядер галактик проявляется в генерации мощного гамма-, рентгеновского УФ, ИК и радиоизлучения в выбросах облаков радиоизлучающей плазмы, в ускорении газовых облаков. И следовательно, они являются наиболее перспективными объектами для построения моделей генерации космических лучей. Диапазон от радио-, до гамма-излучения ВЭ при своем распространении от источника до наблюдателя не поглощается и регистрируется в своем первоначальном виде. Что же касается гамма-излучения СВЭ, то оно при распространении от источника до наблюдателя поглощается. Поток гамма-квантов СВЭ при своем распространении взаимодействует с межгалактическими инфракрасными фотонами. Несмотря на малость сечения взаимодействия фотон-фотон с образованием электронно-позитронной пары для огромных расстояний, на которых находятся от нас галактики, этот процесс может играть существенную роль в изменении начального спектра гамма-квантов и влиять на результаты обнаружения потока гамма-квантов СВЭ. Ранее отмечалось, что гамма-кванты СВЭ можно наблюдать только от объектов, находящихся на расстоянии с $z < 0.1$

(Стекер и др., 1996). Однако в последнее время обнаружены потоки гамма-квантов СВЭ от более удаленных объектов. Так, в НИИ “КрАО” впервые зарегистрирован поток гамма-квантов СВЭ от галактики 3С 66А с $z = 0.444$ (Степанян и др., 2002). Коллаборация MAGIC обнаружила гамма-излучение СВЭ > 100 ГэВ от квазара 3С 279 ($z = 0.536$) (Тешима, 2008; Алберт и др., 2008). Таким образом, вопрос о величине поглощения гамма-квантов СВЭ, как нам кажется, является открытым.

2 Источники гамма-излучения СВЭ

Наблюдения гамма-излучения СВЭ на гамма-телескопах второго поколения проводятся в различных точках земного шара. Таких телескопов во всем мире более десяти. Установлены они как в Южном, так и в Северном полушариях, один из них – в Крымской астрофизической обсерватории (КрАО). В результате наблюдений на наземных гамма-телескопах к настоящему времени обнаружено уже несколько десятков галактических и внегалактических объектов, излучающих гамма-кванты СВЭ, часть из них представлена в таблице 1.

Таблица 1. Результаты наблюдений на ГТ-48

Имя	Тип	Z	Lg(d)	Lg(L1)	Lg(L2)	alpha	Lg(L3)	Lg(L4)
M87	HBL	0.0044	1.71	41.8	41.8	2.60 ± 0.4	41.1	41.1
Mk 421	HBL	0.030	2.20	45.0	45.0	3.00 ± 0.2	44.8	44.9
Mk 501	HBL	0.034	2.23	44.5	44.5	2.45 ± 0.07	44.3	44.4
1ES2344+514	HBL	0.044	2.32	44.0	44.1	2.90 ± 0.2	43.9	44.0
Mk 180	HBL	0.045	2.33	44.1	44.2	3.30 ± 0.7	44.0	44.1
1ES1959+650	HBL	0.047	2.35	44.3	44.4	2.70 ± 0.1	44.2	44.3
PKS0548–323	HBL	0.069	2.49	43.6	43.8	2.80 ± 0.3	43.6	43.7
BL Lac	LBL	0.069	2.49	44.0	44.2	3.60 ± 0.5	44.0	44.1
PKS2005–489	HBL	0.071	2.50	44.3	44.4	4.00 ± 0.4	44.2	44.3
RGB J0152+017	HBL	0.080	2.55	44.1	44.3	3.00 ± 0.4	44.0	44.2
W Comae	IBL	0.102	2.65	45.1	45.3	3.80 ± 0.4	44.9	45.1
PKS2155–304	HBL	0.116	2.70	44.2	44.4	3.32 ± 0.06	44.1	44.3
H1426+428	HBL	0.129	2.74	46.0	46.2	3.70 ± 0.4	45.9	46.2
1ES0806+524	HBL	0.138	2.77	43.8	44.1		43.8	44.1
1ES0229+200	HBL	0.139	2.77	44.2	44.5	2.50 ± 0.19	44.3	44.6
H2356–309	HBL	0.165	2.84	44.6	44.9	3.09 ± 0.24	44.5	44.9
1ES1218+304	HBL	0.182	2.88	45.4	45.8	3.00 ± 0.4	45.2	45.6
1ES0347–121	HBL	0.185	2.89	44.8	45.2	3.10 ± 0.23	44.8	45.2
1ES1101–232	HBL	0.186	2.89	44.7	45.1	2.94 ± 0.20	44.8	45.2
1ES1011+496	HBL	0.212	2.95	45.4	45.9	4.00 ± 0.5	45.5	46.0
PG1553+113	HBL	0.300	3.09	45.9	46.6	4.50 ± 0.3	46.1	46.8
S50716+714	HBL	0.310	3.11	46.3	47.0		46.1	46.8
3С 66А	IBL	0.444	3.26	46.1	47.2		46.1	47.2
3С 279	HBL	0.536	3.33	46.4	47.8	4.10 ± 0.7	46.7	48.1
Cyg X-3			-1.94	36.7				
Cyg γ -2				36.3				
Crab			-2.70	34.0		2.49 ± 0.06		
Vela			-3.30	33.0				
Geminga			-3.82	32.5				

d – расстояние до объекта в Мпк.

L1 – светимость в эрг/с, $E = (0.1-1)$ ТэВ без учета поглощения гамма-квантов

L2 – светимость в эрг/с, $E = (0.1-1)$ ТэВ с учетом поглощения гамма-квантов

L3 – светимость в эрг/с, $E > 1$ ТэВ без учета поглощения гамма-квантов

L4 – светимость в эрг/с, $E > 1$ ТэВ с учетом поглощения гамма-квантов

При составлении таблицы 1 использованы результаты (Хормс, 2008; Викс, 2008; Нешпор, Степанян, 2006). Источники гамма-квантов СВЭ разделены на различные типы: HPQ – квазары с сильной поляризацией излучения, LPQ – квазары со слабой поляризацией излучения, HBL – лацертиды с максимумом излучения в области высокой частоты, LBL – лацертиды с максимумом излучения в области низкой частоты, IBL – лацертиды с максимумом излучения в области средней частоты и FSRQ – квазары с плоским радиоспектром. Среди них более двадцати галактик с активными ядрами (АЯГ). Четыре объекта (Gemina, Vela, Crab и Cyg X-3) содержат пульсары, излучающие гамма-кванты СВЭ (Зыскин и др., 1988; Нешпор и др., 2001; Гриндлей и др., 1975; 1976, Чадвик и др., 1982). Все объекты, перечисленные в таблице, кроме одного (источник *Cyg γ -2*), наблюдаются в широком диапазоне частот от радио- до гамма-излучения СВЭ. Объект *Cyg γ -2* (Нешпор и др., 1995; Нешпор и др., 2009) не сопровождается никакими сопутствующими излучениями на других частотах (и даже в рентгеновском диапазоне), поэтому его принято считать неидентифицированным источником.

3 Зависимость светимости гамма-излучения от расстояния до объекта

В таблице 1 приведены наиболее известные источники гамма-излучения СВЭ. Приведено красное смещение z , расстояние d (Мпк) (Проник, 2010; Райт, 2006), рассчитанное в предположении, что $d = 442$ Мпк для $z = 0.1$, и тогда $d_{(z+0.1)} = dZ + 30000 / H_{(z+0.1)}$, где $H_{(z+0.1)} = H_o \cdot (Sqrt.[Q_m \cdot (1+Z)^3 + Q_v])$ ($Q_m = 0.263$, $Q_v = 0.737$ и $H_o = 65$ км/с · Мпс).

Приведена величина светимости (L1) в эрг·с⁻¹ гамма-излучения СВЭ $E_\gamma = (0.1-1)$ ТэВ, в предположении, что гамма-излучение испускается изотропно и без учета межгалактического поглощения.

В статье (Франческини и др., 2008) рассмотрен вопрос о величине поглощения потока гамма-квантов СВЭ при распространении в межгалактическом пространстве. В (Франческини и др., 2008) приведены величины оптической толщины τ для различных z ($z = 0.01-3.0$) в зависимости от энергии гамма-кванта СВЭ ($\gamma = (0.02-166)$ ТэВ), интегральная величина светимости L в диапазоне энергий $E = (0.1-1)$ ТэВ). С учетом зависимости величины τ от энергии (Франческини и др., 2008) нами вычислена величина потока гамма-квантов СВЭ L_2 , ($E_\gamma = (0.1-1.0)$ ТэВ) для конкретного объекта. Для источников, приведенных в таблице 1, на рисунке 1 представлена зависимость логарифма светимости от логарифма расстояния до объекта $Lg(d)$ без учета поглощения ($Lg(L1)$ – звездочки) и с учетом поглощения ($Lg(L2)$ – кружочки). Линейная аппроксимация методом наименьших квадратов дала следующее выражения. Зависимость светимости от расстояния без учета поглощения гамма-квантов СВЭ:

$$Lg L_\gamma(d) = 2.3 \cdot Lgd + 38.7. \quad (1)$$

Зависимость светимости от расстояния с учетом поглощения гамма-квантов СВЭ:

$$Lg L_\gamma(d) = 3.0 \cdot Lgd + 37.0. \quad (2)$$

Из рис. 1 видно, что с увеличением расстояния до галактики светимость гамма-излучения СВЭ ($\gamma = (0.1-1.0)$ МэВ) растет.

Для гамма-излучения СВЭ $E_\gamma > 1.0$ ТэВ в таблице 1 приведена величина светимости без учета межгалактического поглощения $L3$ и с учетом межгалактического поглощения $L4$ (Франческини и др., 2008). На рис. 2 представлена зависимость логарифма светимости от логарифма расстояния $Lg d$ без учета поглощения ($Lg(L3)$ – крестики) и с учетом поглощения ($Lg(L4)$ – кружочки). Линейная аппроксимация методом наименьших квадратов дала следующее выражение. Зависимость светимости от расстояния без учета поглощения гамма-квантов СВЭ:

$$Lg L_\gamma(d) = 1.54 \cdot Lgd + 39.4. \quad (3)$$

Зависимость светимости от расстояния с учетом поглощения гамма-квантов СВЭ:

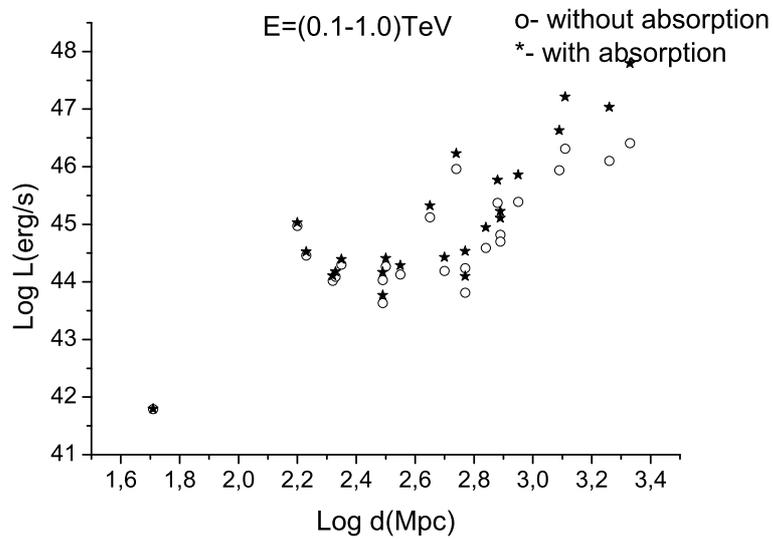


Рис. 1. Зависимость светимости гамма-излучения СВЭ $E_\gamma = (0.1-1)$ ТэВ от расстояния до объекта

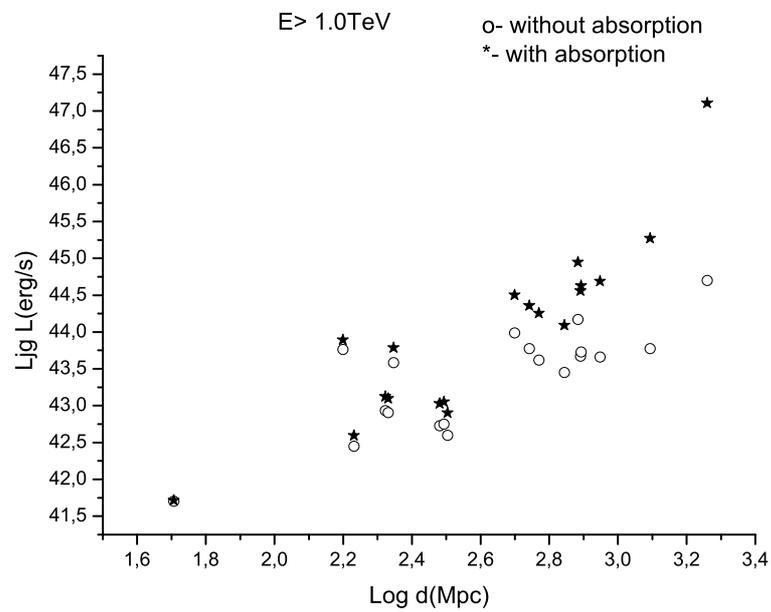


Рис. 2. Зависимость светимости гамма-излучения СВЭ $E_\gamma > 1$ ТэВ от расстояния до объекта

$$LgL_\gamma(d) = 2.9 \cdot Lgd + 36.5. \quad (4)$$

Из рис. 1, 2 видно, что если расстояние до объекта изменяется на порядок, то светимость гамма-излучения СВЭ (с учетом поглощения) возрастает на три порядка.

Далее нами были использованы опубликованные данные наблюдений гамма-излучения высоких энергий ВЭ ($E_\gamma > 100$ МэВ), полученные на спутнике GRO COMPTON прибором EGRET (третий EGRET-каталог; Хартман и др., 1999). Из данных для 271 объекта, полученных в период с 22 апреля 1991 года по 3 октября 1995 года, нами были взяты только те гамма-источники (78 объектов), для которых в этом же каталоге приводится красное смещение (z). Для каждого объекта в публикации (Хартман и др., 1999) приводится несколько значимых измерений гамма-потока, проведенных в разное время. С учетом веса каждого измерения нами были вычислены средние значения величин потоков гамма-излучения для каждого объекта, затем их величины светимости L (эрг/с) в предположении, что гамма-излучение испускается изотропно. Результаты представлены на рис. 3, где по оси абсцисс отложено Lgd (d – расстояние до объекта в Мпк), а по оси ординат LgL (L – светимость в эрг·с⁻¹). Из рис. 3 видно, что светимость гамма-излучения ВЭ растет с увеличением расстояния. Линейная аппроксимация методом наименьших квадратов дает следующее выражение:

$$LgL_\gamma(d) = 2.1 \cdot Lgd + 39.2. \quad (5)$$

Светимость объектов в области энергий $E_\gamma > 100$ МэВ (выражение (5)) и ($E_\gamma > (0.1-1.0)$ ТэВ (выражение (1), без учета поглощения) растет как квадрат расстояния, а в области энергий $E_\gamma > (0.1-1.0)$ ТэВ и $E_\gamma > 1.0$ ТэВ с учетом поглощения (выражения (2) и (4)) растет как куб расстояния. Напрашивается вывод, что с увеличением расстояния до объекта общая энергия галактик с активными ядрами, связанная, по-видимому, с числом частиц, участвующих в процессе излучения, растет.

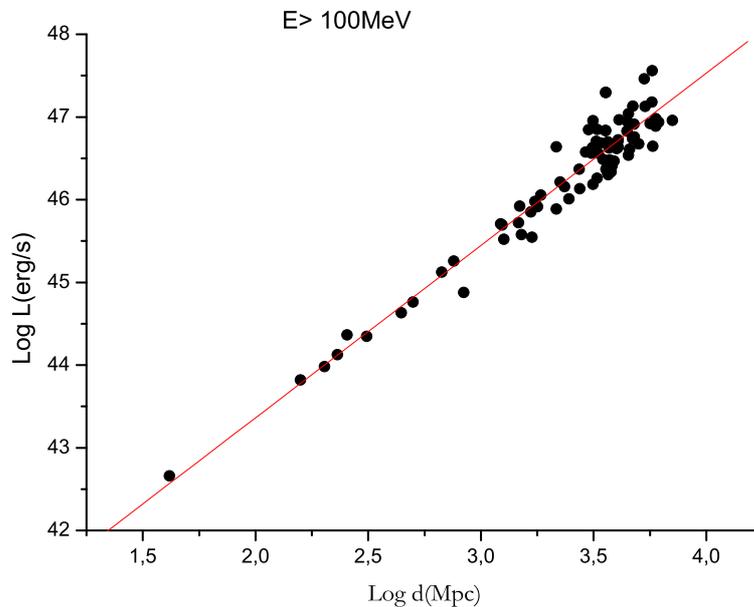


Рис. 3. Зависимость светимости гамма-излучения ВЭ $E_\gamma > 100$ МэВ от расстояния до объекта

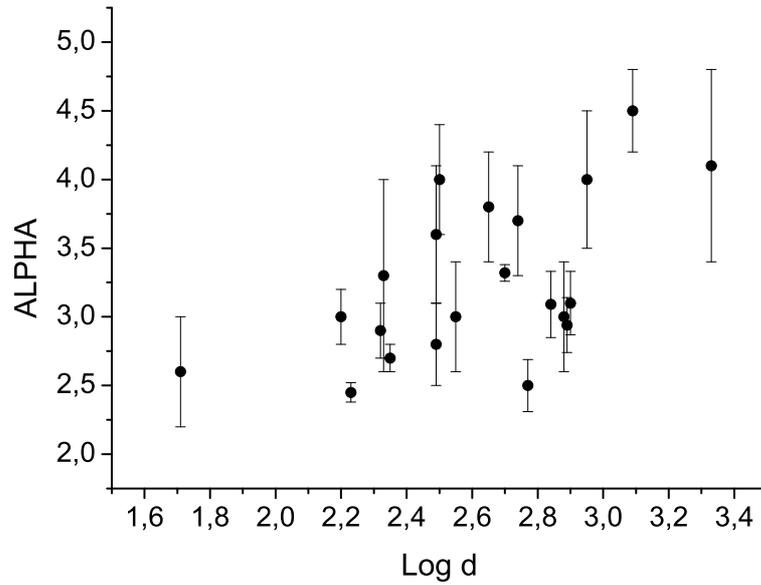


Рис. 4. Зависимость показателя дифференциального спектра гамма-излучения СВЭ от расстояния до объекта

4 Показатель дифференциального спектра гамма-излучения СВЭ

Высокая чувствительность современных наземных гамма-телескопов с многоэлементными детекторами (гамма-телескопы второго поколения; Владимирский и др., 1994) позволяет по данным регистрации черенковских вспышек строить дифференциальный спектр гамма-излучения СВЭ в диапазоне (0.1–10) ТэВ. В работе (Хормс, 2008) для 22 гамма-источников СВЭ приведены значения показателя спектра α (α) (таблица 1). Известно, что с увеличением расстояния до источника СВЭ величина поглощения гамма-излучения растет с увеличением энергии, следовательно, спектр становится более крутым, т. е. величина α должна расти с увеличением расстояния до источника.

На рис. 4 приведена зависимость показателя спектра от расстояния. Из рис. 4 видно, что коэффициент корреляции невысокий, поэтому утверждать, что показатель спектра зависит от расстояния до источника не представляется возможным. Можно высказать лишь предположение, что эта зависимость очень слабая.

Таблица 2. Результаты наблюдений на ГТ-48

Имя	Тип	Z	LogL(эрг/с)	alpha
M87	FRI	0.0044	41.8	2.6 ± 0.4
			42.3	2.2 ± 0.2
Mk 421	HBL	0.030	45.0	3.0 ± 0.2
			45.5	2.06 ± 0.03
Mk 501	HBL	0.034	44.5	2.45 ± 0.07
			45.4	2.09 ± 0.03
1ES2344+514	HBL	0.044	44.0	2.9 ± 0.2
			45.3	2.5 ± 0.2
1ES1959+650	HBL	0.047	44.3	2.7 ± 0.1
			45.0	1.8 ± 0.2
PKS2155-304	HBL	0.116	44.1	3.4 ± 0.1
			46.8	2.7 ± 0.1

В таблице 2 (Хормс, 2008) приведены показатели дифференциального спектра a для двух состояний активности шести галактик с активными ядрами.

Из таблицы 2 видно, что с увеличением светимости (активности), показатель дифференциального спектра a убывает. В среднем при увеличении светимости АЯГ на один порядок показатель дифференциального спектра a уменьшается на 0.52 ± 0.08 , т. е. эффект уменьшения a наблюдается с очень высокой достоверностью (6.5 стандартных отклонения).

Таким образом, с увеличением активности спектр гамма-излучения СВЭ становится более пологим, это означает, что во время возмущения частицы более высоких энергий ускоряются более эффективно.

5 Заключение

В заключение отметим такой факт, что нормальные галактики, мощность излучения которых в радиодиапазоне (30 м – 3 см) составляет 10^{37} эрг·с⁻¹, имеют расстояние примерно 0.7 Мпк, радиогалактики умеренной мощности порядка 10^{40} эрг·с⁻¹ находятся на расстоянии примерно 7 Мпк, а мощная радиогалактика (двойная галактика Лебедь А) излучает в радиодиапазоне 10^{45} эрг·с⁻¹ и находится на расстоянии 171 Мпк (Физика космоса, 1986).

Таким образом, мощность излучения внегалактических объектов растет с увеличением расстояния до них. Как это можно объяснить? Возможно, это просто селекция. С расстоянием объем Вселенной увеличивается, растет и число мощных объектов, а следовательно, вероятность обнаружения мощного объекта на больших расстояниях растет, поэтому мы и наблюдаем такую зависимость. Число зарегистрированных объектов на спутнике GRO COMPTON прибором EGRET (третий EGRET-каталог) растет пропорционально объему. Рис. 3 иллюстрирует такое предположение. Почему нет объектов большой светимости на малых расстояниях? Возможно, это связано с космологией, т. е. такова природа развития Вселенной (более молодые объекты светят ярче), но тут, по-видимому, нужно поставить много знаков вопроса. Дать определенное объяснение полученному результату мы не можем, но считаем, что этот результат представляет несомненный интерес и требует дальнейшего изучения. Рост светимости как квадрат расстояния (гамма-излучение СВЭ $\gamma = (0.1-1.0)$ ТэВ и гамма-излучение ВЭ) можно объяснить законом распространения излучения, но тогда все АЯГ, независимо от расстояния, на котором они от нас расположены, излучают равные потоки (кв/см²·с) – это как-то трудно представить. Кроме того, если светимость растет как квадрат расстояния, то где же поглощение гамма-квантов $E_\gamma = 0.1-1.0$ ТэВ? Хотя для гамма-квантов $E_\gamma > 1.0$ ТэВ такой закон не соблюдается. Светимость растет медленнее, чем квадрат расстояния, это может означать, что поглощение гамма-квантов происходит на более высоких энергиях $E_\gamma > 1.0$ ТэВ, что также подтверждается зависимостью величины показателя спектра от расстояния до объекта.

Выводы: Светимость АЯГ растет с увеличением расстояния до объекта.

Величина поглощения гамма-квантов СВЭ значительно меньше, чем приводимые величины в работе Франческини и др. (2008), и как показывают полученные результаты данной работы, обнаружить поток гамма-квантов СВЭ с помощью современных гамма-телескопов возможно даже от объектов с $Z > 0.5$.

Автор выражает благодарность Кочетковой С.Г. за помощь в оформлении статьи.

Литература

- Алберт и др. (Albert J. et al.) // Science. 2008. V. 320. P. 1752.
 Викс (Weekes T.C.) // arXiv:0811.1197v1 [astro-ph] 7 Nov 2008.
 Владимирский Б.М., Зыскин Ю.Л., Корниенко А.А. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1994. Т. 91. С. 74.
 Гриндлей и др. (Grindlay J.E., Helmken H.F., Weekes T.C.) // Astrophys. J. 1976. V. 209. P. 592.

- Гриндлей и др. (Grindlay J.E., Helmken H.F., Brown Hanbury R., Davis J., Allen L.R.) // *Astrophys. J.* 1975. V. 201. P. 81.
- Зыскин Ю.Л., Нешпор Ю.И., Степанян А.А. // *Изв. АН СССР. сер. физ.* 1988. Т. 52. С. 2325.
- Нешпор Ю.И., Степанян А.А., Калекин О.Р. и др. // *Письма в Астрон. журн.* 1998. Т. 24. С. 167.
- Нешпор Ю.И., Степанян А.А. // *Астрон. журн.* 2006. Т. 83. С. 771.
- Нешпор Ю.И., Степанян А.А., Зыскин Ю.И. и др. // *Письма в Астрон. журн.* 2001. Т. 27. С. 266.
- Нешпор и др. (Neshpor Yu.I., Kalekin O.R., Stepanian A.A., et al.) // *Proc. 25th ICRC.* 1995. Rome. Italy. V. 2. P. 385.
- Нешпор Ю.И., Жовтан А.В., Жоголев Н.А. и др. // *Изв. РАН. сер. физ.* 2009. Т. 73. С. 694.
- Проник В.И. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 2010. (в печати).
- Райт (Wright E.L.) // *PASP.* 2006. V. 118. P. 1711.
- Стекер и др. (Stecker F.W., De Jager O.C., Salomon M.N.) // *Astrophys. J.* 1996. V. 473. P. 75.
- Степанян А.А., Нешпор Ю.И., Андреева Н.А. и др. // *Астрон. журн.* 2002. Т. 79. №. 8. С. 702.
- Томпсон и др. (Thompson D.J., Bertsch D.L., Dingus B.L., et al.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1995. V. 101. P. 259.
- Тешима и МАГИК (Teshima M. for The MAGIC Collaboration) // *Astron. Telegram.* 2008. №. 1500.
- Сюняев Р.А. (ред.) // *Физика космоса. М.: Советская энциклопедия.* 1986.
- Франческини и др. (Franceschini A., Rodighiero G., Vaccari V.) // *Astron. Astrophys.* 2008. V. 487. P. 837.
- Хормс (Norms D.) // *arXiv:0808.3744v2 [astro-ph]* 4 Sep 2008.
- Хартман и др. (Hartman R.C., Bertsch D.L., Bloom S.D., et al.) // *Astrophys. J.* 1999. V. 193. P. 79.
- Чадвик и др. (Chadwick P.M., Dipper N.A., Dawthwaite J.C., et al.) // *Nature.* 1982. V. 318. P. 642.