

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	$2.60 \pm 0.4$	41.1	41.1
Mk 421	HBL	0.030	2.20	45.0	45.0	$3.00 \pm 0.2$	44.8	44.9
Mk 501	HBL	0.034	2.23	44.5	44.5	$2.45 \pm 0.07$	44.3	44.4
1ES2344+514	HBL	0.044	2.32	44.0	44.1	$2.90 \pm 0.2$	43.9	44.0
Mk 180	HBL	0.045	2.33	44.1	44.2	$3.30 \pm 0.7$	44.0	44.1
1ES1959+650	HBL	0.047	2.35	44.3	44.4	$2.70 \pm 0.1$	44.2	44.3
PKS0548–323	HBL	0.069	2.49	43.6	43.8	$2.80 \pm 0.3$	43.6	43.7
BL Lac	LBL	0.069	2.49	44.0	44.2	$3.60 \pm 0.5$	44.0	44.1
PKS2005–489	HBL	0.071	2.50	44.3	44.4	$4.00 \pm 0.4$	44.2	44.3
RGB J0152+017	HBL	0.080	2.55	44.1	44.3	$3.00 \pm 0.4$	44.0	44.2
W Comae	IBL	0.102	2.65	45.1	45.3	$3.80 \pm 0.4$	44.9	45.1
PKS2155–304	HBL	0.116	2.70	44.2	44.4	$3.32 \pm 0.06$	44.1	44.3
H1426+428	HBL	0.129	2.74	46.0	46.2	$3.70 \pm 0.4$	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	$2.50 \pm 0.19$	44.3	44.6
H2356–309	HBL	0.165	2.84	44.6	44.9	$3.09 \pm 0.24$	44.5	44.9
1ES1218+304	HBL	0.182	2.88	45.4	45.8	$3.00 \pm 0.4$	45.2	45.6
1ES0347–121	HBL	0.185	2.89	44.8	45.2	$3.10 \pm 0.23$	44.8	45.2
1ES1101–232	HBL	0.186	2.89	44.7	45.1	$2.94 \pm 0.20$	44.8	45.2
1ES1011+496	HBL	0.212	2.95	45.4	45.9	$4.00 \pm 0.5$	45.5	46.0
PG1553+113	HBL	0.300	3.09	45.9	46.6	$4.50 \pm 0.3$	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	$4.10 \pm 0.7$	46.7	48.1
Cyg X-3			-1.94	36.7				
Cyg $\gamma$ -2				36.3				
Crab			-2.70	34.0		$2.49 \pm 0.06$		
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 (Geminga, 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 $\gamma$ -2*), наблюдаются в широком диапазоне частот от радио- до гамма-излучения СВЭ. Объект *Cyg $\gamma$ -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  $H_{(z+0.1)} = H_o \cdot (Sqrt \cdot [Q_m \cdot (1+Z)^3 + Q_v])$  ( $Q_m = 0.263$ ,  $Q_v = 0.737$  и  $H_o = 65$  км/с · Мпс).

Приведена величина светимости (L1) в эрг·с<sup>-1</sup> 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  $\tau$  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  $\tau$  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  $L_3$  и с учетом межгалактического поглощения  $L_4$  (Франческини и др., 2008). На рис. 2 представлена зависимость логарифма светимости от логарифма расстояния  $Lg d$  без учета поглощения ( $Lg(L_3)$  – крестики) и с учетом поглощения ( $Lg(L_4)$  – 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:

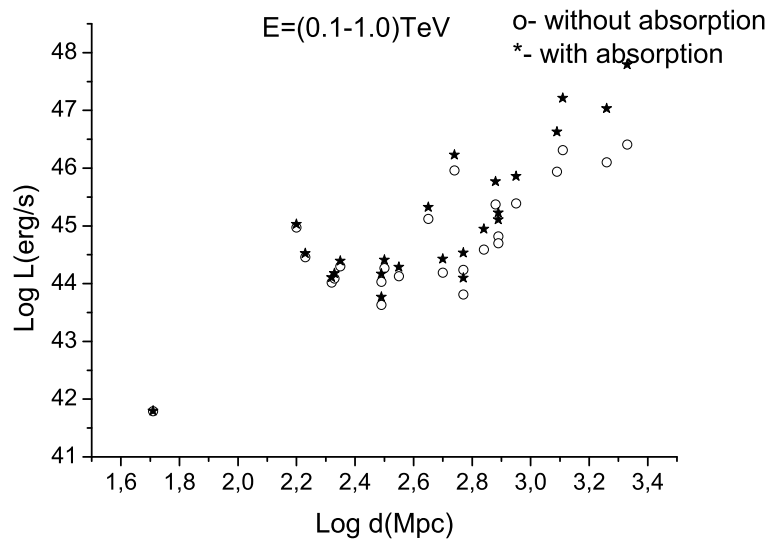


Рис. 1. Зависимость светимости гамма-излучения СВЭ  $E_\gamma = (0.1-1)$  ТэВ от расстояния до объекта

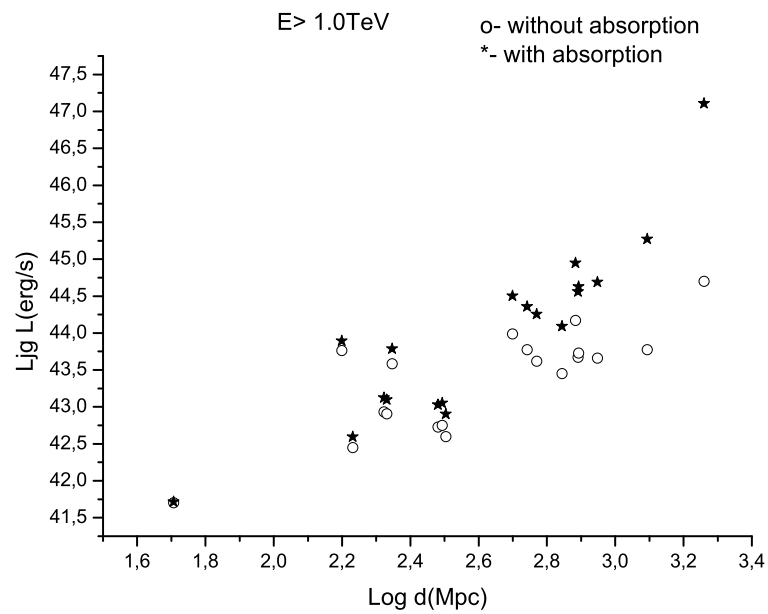


Рис. 2. Зависимость светимости гамма-излучения СВЭ  $E_\gamma > 1$  ТэВ от расстояния до объекта

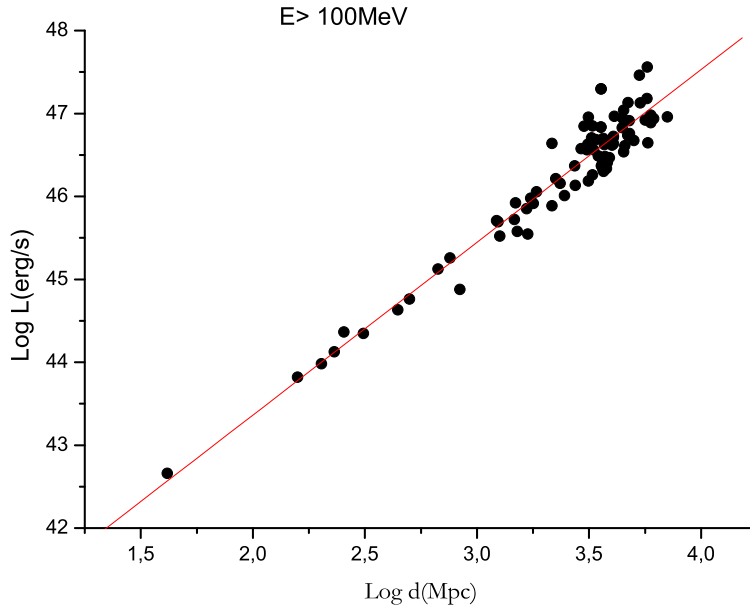
$$LgL_\gamma(d) = 2.9 \cdot Lgd + 36.5. \quad (4)$$

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.

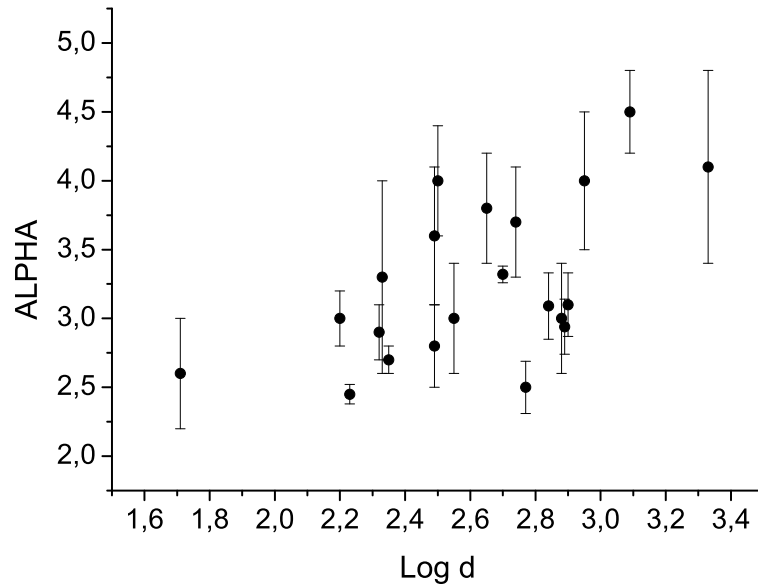
Далее нами были использованы опубликованные данные наблюдений гамма-излучения высоких энергий ВЭ ( $E_\gamma > 100$  МэВ), полученные на спутнике GRO COMPTON прибором EGRET (третий EGRET-каталог; Хартман и др., 1999). Из данных для 271 объекта, полученных в период с 22 апреля 1991 года по 3 октября 1995 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<sup>-1</sup>). 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  $\alpha$  ( $\alpha$ ) (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  $\alpha$  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	$2.6 \pm 0.4$
			42.3	$2.2 \pm 0.2$
Mk 421	HBL	0.030	45.0	$3.0 \pm 0.2$
			45.5	$2.06 \pm 0.03$
Mk 501	HBL	0.034	44.5	$2.45 \pm 0.07$
			45.4	$2.09 \pm 0.03$
1ES2344+514	HBL	0.044	44.0	$2.9 \pm 0.2$
			45.3	$2.5 \pm 0.2$
1ES1959+650	HBL	0.047	44.3	$2.7 \pm 0.1$
			45.0	$1.8 \pm 0.2$
PKS2155-304	HBL	0.116	44.1	$3.4 \pm 0.1$
			46.8	$2.7 \pm 0.1$

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

Из таблицы 2 видно, что с увеличением светимости (активности), показатель дифференциального спектра  $\alpha$  убывает. В среднем при увеличении светимости АЯГ на один порядок показатель дифференциального спектра  $\alpha$  уменьшается на  $0.52 \pm 0.08$ , т. е. эффект уменьшения  $\alpha$  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<sup>-1</sup>, имеют расстояние примерно 0.7 Мпк, радиогалактики умеренной мощности порядка  $10^{40}$  эрг·с<sup>-1</sup> находятся на расстоянии примерно 7 Мпк, а мощная радиогалактика (двойная галактика Лебедь А) излучает в радиодиапазоне  $10^{45}$  эрг·с<sup>-1</sup> 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/см<sup>2</sup>·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.