

УДК 524.7

Гамма-астрономии в Крыму 40 лет

Ю.И. Нешпор, В.П. Фомин, А.А. Степанян

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 20 октября 2008 г.

Аннотация. В Крымской астрофизической обсерватории исследования в области астрофизики высоких энергий были начаты в 1955 году. Через три года под руководством Арнольда Арташесовича Степаняна была создана станция космических лучей, а затем лаборатория гамма-астрономии. В лаборатории работали такие приборы, как мезонный (кубический) телескоп, нейтронный монитор, измерения потока космических лучей в стратосфере производились на шарах-зондах. Для поиска гамма-источников сверхвысоких энергий (СВЭ) в 1969 году был запущен регистратор черенковских вспышек РЧВ-1. В 1989 году были начаты наблюдения на новом гамма-телескопе второго поколения ГТ-48. В результате наблюдений на гамма-телескопах РЧВ-1 и ГТ-48 впервые обнаружено гамма-излучение СВЭ от рентгеновского источника Суг X-3, нового объекта Суг γ -2, от пульсара Геминга, от активных ядер галактик 3С 66А и ВL Lac.

Ключевые слова: Гамма-астрономия, черенковские вспышки, космические лучи

1 Введение

В Крымской астрофизической обсерватории исследования в области астрофизики высоких энергий были начаты в 1955 году. Через три года под руководством Арнольда Арташесовича Степаняна была создана Станция космических лучей, из которой впоследствии выросла лаборатория гамма-астрономии. Основная задача, которая стояла перед сотрудниками станции – это исследование космического фона элементарных частиц у поверхности Земли и в ее атмосфере. Станция была оснащена двумя установками: кубическим телескопом для регистрации мезонной компоненты космических лучей (Степанян, 1960) и нейтронным монитором для регистрации более низкоэнергичных частиц. Эти приборы работали до 1961 года, их показания посылались в Международный центр данных. Исследования показали, что магнитные бури сопровождаются понижением интенсивности космических лучей по всему энергетическому спектру (Степанян, Владимирский, 1960). Был также установлен ряд закономерностей в распространении космических лучей, генерированных на Солнце в межпланетном пространстве (Владимирский, Степанян, 1961). Было показано, что длительности хромосферных вспышек коррелируются с амплитудами понижения интенсивности космических лучей во время эффекта Форбуша (Степанян, 1962).

С 1961 по 1965 годы на Станции проводились измерения потока космических лучей в стратосфере с помощью шаров зондов. Анализ полученных данных показал, что практически все Солнечные вспышки приводит к генерации частиц высоких энергий (Владимирский, 1968).

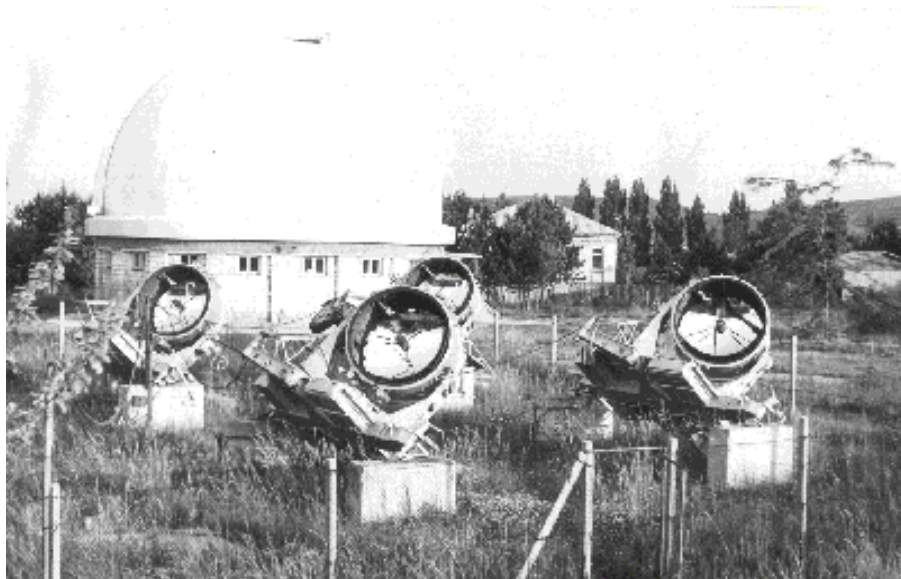


Рис. 1. Регистратор черенковских вспышек РЧВ-1

2 Результаты наблюдений на регистраторе черенковских вспышек РЧВ-1

С 1965 года были начаты работы по созданию детектора для обнаружения гамма-излучения сверхвысоких энергий (СВЭ, $E > 10^{12}$ эВ) от галактических и внегалактических объектов, методом регистрации черенковских вспышек от электронно-фотонного ливня, возникающего при попадании гамма-кванта в атмосферу Земли. Первые наблюдения были начаты в 1969 году на простейших по нынешним временам гамма-телескопах (детекторах), изготовленных из прожекторов с зеркалами диаметром 1.5 метра, в фокусе которых помещались фотоэлектронные умножители (ФЭУ) (Степанян и др., 1971). Детектор (РЧВ-1) представлял собой две пары телескопов, включенных попарно на совпадения (рис. 1).

За период с 1969 по 1980 гг. были исследованы объекты различных типов: остатки сверхновых, пульсары, радиогалактики, рентгеновские источники, квазары и другие. Для большинства объектов были определены лишь верхние значения потоков гамма-квантов СВЭ. Однако при сканировании галактической плоскости (1971–1973 гг.) в созвездии Кассиопеи был обнаружен источник гамма-излучения СВЭ с координатами $\alpha = 1^h 16 \pm 4^m$, $\delta = 62^\circ 00$ (Степанян и др., 1972; Фомин и др., 1975). Источник был назван Cas γ -1. В 1971 году в ходе эксперимента UNURU в рентгеновском диапазоне был обнаружен источник 4U 0115+63, представляющий собой двойную систему с рентгеновским пульсаром (период 3.6 с.), орбитальный период которой – 24 дня (Раппопорт и др., 1978). На спутнике SAS-2 от этого объекта был зарегистрирован поток гамма-квантов с энергией $E > 10^8$ эВ (Хоустон, Волфиндейл, 1983). Близость координат 4U 0115+63 и Cas γ -1 и найденный период 24 дня в наблюдениях гамма-источника СВЭ (Нешпор, Зыскин, 1988) дали основания отождествить эти два объекта. При наблюдениях источника Cas γ -1 в 1992 и 1993 годах в Крыму (гамма-телескоп ГТ-48) был зарегистрирован поток гамма-квантов СВЭ с достоверностью 4.5σ . Таким образом можно предполагать, что объект 4U 0115+63(Cas γ -1) излучает в широком диапазоне частот от рентгеновского до гамма СВЭ.

Регулярные наблюдения рентгеновского источника Cyg X-3 на регистраторе черенковских вспышек РЧВ-1 в Крыму были начаты 5-го сентября 1972 года, после получения сообщения о мощной вспышке в радиодиапазоне. Первые же наблюдения в сентябре 1972 года показали, что объект Cyg X-3 излучает гамма-кванты СВЭ, что впоследствии подтвердили другие обсерватории. Наблюдения рентгеновского источника Cyg X-3 на регистраторе РЧВ-1 продолжались вплоть до



Рис. 2. Гамма-телескоп для наблюдений ложного неба в Чили

1980 года. Девятилетние наблюдения объекта Суг Х-3 позволили обнаружить ряд интересных его особенностей. Найден в излучении гамма-квантов СВЭ период 4.8 часа и его производная ($3 \cdot 10^{-9}$ с/с), обнаружены вариации потока гамма-квантов с периодом 328 дней (Нешпор и др., 1980; Нешпор, Зыскин, 1982; Нешпор, Зыскин, 1988; Зыскин и др., 1988). Сходство электромагнитных спектров Крабовидной туманности и рентгеновского источника Сег Х-3 позволило многим исследователям высказать предположение о наличии пульсара в объекте Суг Х-3. Для решения этого вопроса в КраО была создана специальная аппаратура для регистрации точного времени черенковской вспышки и проведены наблюдения Суг Х-3 на установки РЧВ-1 в период с 26.09. по 04.10.1978 года. Поиск периода в диапазоне от 8 мс до 100 секунд проводился методом наложения эпох на ЭВМ БЭСМ-6, и потребовалось 100 часов машинного времени. В результате было показано, что объект Суг Х-3 содержит пульсар с периодом 9.2209 мс, излучающий гамма-кванты СВЭ (Зыскин и др., 1988). Суг Х-3 – это тесная двойная система, в состав которой, вероятно, входят нейтронная звезда (или черная дыра) и звезда Вольфа-Райе.

Многолетние наблюдения галактической плоскости в различных ее областях показали в среднем наличие гамма-излучения СВЭ от этого протяженного объекта (Фомин, 1977). Впоследствии спустя 30 лет этот результат был подтвержден на гамма-установке HESS.

В 1971 году для наблюдений южного неба в Чили был разработан и изготовлен гамма-телескоп первого поколения (типа РЧВ-1), который был отвезен в Чили, там собран и отлажен (рис. 2). Были проведены первые наблюдения, и только военный переворот в Чили помешал в дальнейшем проводить наблюдения на нем.

3 Результаты наблюдений на гамма-телескопе ГТ-48

В 1973 году сотрудниками лаборатории гамма-астрономии была начата разработка, а затем и строительство нового гамма-телескопа второго поколения (ГТ-48), состоявшего из 48 зеркал диаметром 1.2 метра (общая площадь 54 м^2). Гамма-телескоп ГТ-48 представляет собой первую в мире стереоскопическую установку, которая предназначена для регистрации изображений черенковских вспышек, вызываемых как протонно-ядерной компонентой космических лучей, так и гамма-квантами СВЭ ($E > 10^{12}$ эВ) при их попадании в атмосферу Земли. Это единственная в

мире установка, которая одновременно регистрирует черенковские вспышки как в видимом (3000–5500 Å), так и в ультрафиолетовом (2000–3000 Å) диапазонах. Гамма-телескопы второго поколения (следовательно и телескоп ГТ-48) позволяют определить не только величину потока, но и его направление, а следовательно и координаты источника гамма-излучения СВЭ (Владимирский и др., 1994). Наблюдения на гамма-телескопе ГТ-48 были начаты в 1989 году и ведутся по настоящее время. Анализ данных наблюдений 1989, 1994 и 1995 годов показал: объект Суг Х-3 является источником гамма-квантов СВЭ, что подтверждает результаты наблюдений Суг Х-3 на установке РЧВ-1 в период 1972–1980 гг. (Владимирский и др., 1991; Нешпор и др., 2003).

Успешными оказались наблюдения Крабовидной туманности в октябре 1993 года. За восемь часов наблюдений был зарегистрирован поток гамма-квантов СВЭ на уровне пяти стандартных отклонений (ст. откл.), в то время как на установке обсерватории Уиппла с 37-канальным детектором аналогичный результат был получен за 20 часов наблюдений (Калекин и др., 1995; Панч и др., 1991). Полученные результаты показывают, что телескопы второго поколения в десятки раз эффективнее гамма-телескопов 60–70-х годов и, что телескоп ГТ-48 имеет некоторые преимущества по сравнению с другими черенковскими телескопами.

При наблюдениях в сентябре-октябре 1993 года созвездия Лебедя был зарегистрирован поток гамма-квантов СВЭ с высокой достоверностью (7 ст. откл.) от нового объекта, расположенного вблизи рентгеновского источника Суг Х-3 (Нешпор и др., 1995). Этому источнику гамма-излучения СВЭ было дано название Суг γ -2 (Калекин и др., 1996). Спустя 10 лет в 2003 году на 28-й Международной конференции по космическим лучам было сделано сообщение о регистрации потока гамма-квантов СВЭ от объекта Суг γ -2 (Суг ОВ2) при наблюдениях группой HEGRA в период 1999–2002 гг. (Роуэлл, Хорнс, 2003). Анализ результатов наблюдений области Лебедя в период 1989–1990 гг., проведенных в обсерватории Whipple, также показал наличие потока гамма-квантов СВЭ от объекта Суг γ -2 (Ленг и др., 2004). Гамма-источник Суг γ -2 остается до настоящего времени неидентифицированным объектом. Суг γ -2 расположен в области чрезвычайно активного звездообразования в созвездии Лебедя, содержащей большое количество рентгеновских источников и источников низкоэнергетического гамма-излучения, тем не менее этот объект не имеет “дублеров” на других длинах волн, и (что особенно странно) их нет даже в рентгеновском диапазоне. В связи с этим гамма-источник СВЭ Суг γ -2, по-видимому, можно отнести к классу высокоэнергичных источников гамма-излучения СВЭ неизвестной природы.

В 1996–1997 годах были проведены наблюдения объекта Геминга. Это один из самых загадочных объектов астрофизических исследований наших дней. Прежде всего он интересен тем, что поток излучения от него в гамма-диапазоне $E > 50$ МэВ в тысячу раз больше, чем в рентгеновском, и в 200 тысяч раз больше, чем в оптическом. Анализ данных наблюдений на ГТ-48 показал, что этот объект является также источником гамма-квантов сверхвысоких энергий. Анализ распределения гамма-квантов по времени методом наложения эпох показал наличие периодической составляющей в гамма-излучении СВЭ с периодом 0.237 с. Показано также, что поток излучения гамма-квантов СВЭ модулируется с периодом “59 с”. Значения периодов (0.237 с. и 59 с.) получены ранее по спутниковым данным в рентгеновском и гамма $E > 35$ МэВ диапазонах.

В начале 90-х годов гамма-излучение СВЭ было обнаружено от активных ядер галактик (АЯГ) Мк 421 и Мк 501. С 1996 года в КрАО ведутся наблюдения АЯГ на гамма-телескопе ГТ-48 (Степанян и др., 2002; Нешпор и др., 2001; Нешпор и др., 2007). Результаты наблюдений представлены в таблице. Величина светимости гамма-излучения СВЭ (L) в эрг/с дана в предположении, что гамма-излучение испускается изотропно и без учета межгалактического поглощения. Гамма-излучение СВЭ от активных ядер галактик 3С66А и VL Лас обнаружено впервые в Крыму. Показано, что потоки в гамма-диапазоне СВЭ от АЯГ 3С 66А и VL Лас коррелируют с потоками в оптике. Для галактики Мк 501 обнаружена переменность гамма-излучения СВЭ от ночи к ночи (Андреева и др., 2000). По данным наблюдений НИИ “КрАО” в 1997, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006 годах поток гамма-квантов СВЭ галактики Мк 501 изменяется от года к году, подтверждено наличие периодической составляющей с периодом 23.2 дня (Нешпор и др., 2003), найдена положительная корреляция между средними за год потоками в рентгене (2–10 кэВ) и гамма СВЭ (Нешпор, Жовтан, 2008).

Особо отметим, что спектры активных ядер галактик похожи друг на друга и имеют



Рис. 3. Гамма-телескоп второго поколения ГТ-48

Таблица 1. Поток гамма-источников

№	Имя	кпк	$\lg L(\text{эрг/с})$
1	3C66A	1800000	46.3
2	1H1426+428	516000	44.0
3	BL Lac	280000	44.5
4	Mk 501	136000	44.5
5	Mk 421	124000	44.0

два максимума (рис. 4). Один максимум – низкочастотный – приходится на оптическую ультрафиолетовую область или смещается в область рентгена для АЯГ, излучающих гамма-кванты СВЭ, другой – высокочастотный максимум – находится в области гамма-излучения высоких энергий. (Нешпор, Степанян, 2006).

4 Заключение

Подводя итог отметим, что лаборатория непрерывно развивалась как в техническом, так и в научном планах. Сотрудниками лаборатории гамма-астрономии сделаны следующие открытия:

1. В результате наблюдений созвездия Кассиопеи (в 1971–1973 и 1992, 1993 годах) было показано, что источник 4U 0115+63, представляющий собой двойную систему с рентгеновским пульсаром, излучает гамма-кванты СВЭ.
2. Многолетние наблюдения галактической плоскости в различных ее областях показали в среднем наличие гамма-излучения СВЭ от этого протяженного объекта.
3. Наблюдения в сентябре 1972 года показали, что объект Суг X-3 излучает гамма-кванты СВЭ. В его излучении найден период 4.8 часа и его производная $3 \cdot 10^{-9}$ с/с, обнаружены вариации потока гамма-квантов с периодом 328 дней.

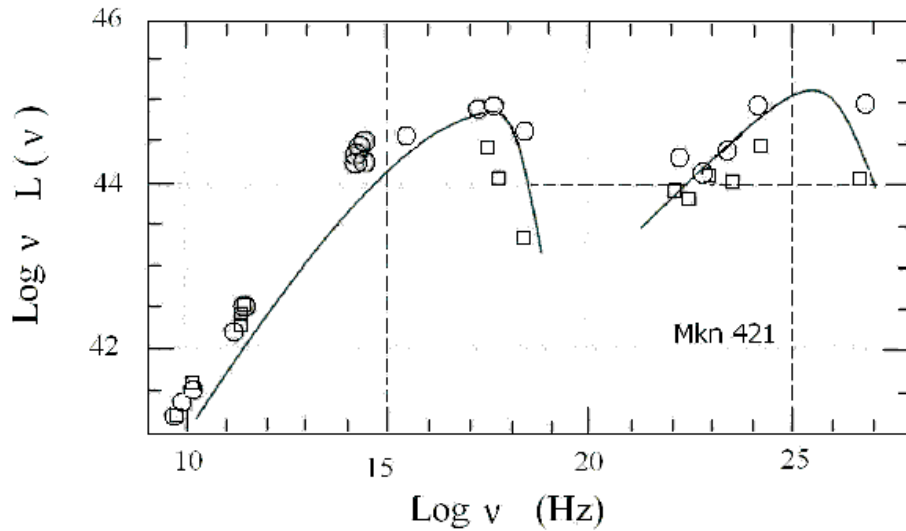


Рис. 4. Спектр галактики Мк 421

4. При наблюдениях в сентябре-октябре 1993 года области Лебедя был зарегистрирован поток гамма-квантов СВЭ с высокой достоверностью (7-ст. откл.) от нового объекта, расположенного вблизи рентгеновского источника Суг Х-3. Этому источнику гамма-излучения СВЭ было дано название Суг γ -2.
5. Наблюдения объекта Геминга в 1996–1997 годах показали, что этот объект является источником гамма-квантов СВЭ. Гамма-излучение изменяется со временем с периодом пульсара 0.237 с., а также модулируется с периодом “59 с”.
6. Обнаружены потоки в гамма-диапазоне СВЭ от активных ядер галактик 3C 66 А и VL Лас.

Впоследствии спустя 10 лет все эти результаты были подтверждены наблюдениями на зарубежных гамма-телескопах.

Литература

- Андреева Н.А., Зыскин Ю.Л., Калекин О.Р., Нешпор Ю.И., Степанян А.А., Фомин В.П., Чаленко Н.Н., Шитов В.Г. // Письма в Астрон. журн. 2000. Т. 26. №. 3. С. 243.
- Владимирский Б.М., Степанян А.А. // Астрон. журн. 1961. Т. 38. №. 3. С. 432.
- Владимирский Б.М. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1968. Т. 38. С. 132.
- Владимирский Б.М. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1994. Т. 91. С. 74.
- Владимирский Б.М. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1991. Т. 55. С. 2045.
- Зыскин Ю.Л. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1988. Т. 52. С. 2325.
- Зыскин Ю.Л., Нешпор Ю.И., Степанян А.А. // Астрон. цирк. 1987. №. 1508.
- Калекин О.Р., Нешпор Ю.И., Степанян А.А. и др. // Кинем. и физ. небесн. тел. 1996. Т. 12. С. 92.
- Калекин О.Р. и др. // Письма в Астрон. журн. 1995. Т. 21. С. 184.
- Ленг и др. (Lang M.J., Carter-Lewis D.A., Fegan D.J. et al.) // Astron. Astrophys. 2004. V. 423. №. 2. P. 415.
- Нешпор Ю.И., Зыскин Ю.Л. // Переменные звезды. 1982. Т. 21. С. 709.
- Нешпор Ю.И. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1980. Т. 61. С. 61.
- Нешпор Ю.И., Зыскин Ю.Л. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1988. Т. 78. С. 122.
- Нешпор Ю.И. и др. // Письма в Астрон. журн. 2003. Т. 29. С. 277.
- Нешпор Ю.И. и др. (Neshpor Yu.I., Kalekin O.R., Stepanian A.A. et al.) // Proc. 25th ICRC. 1995. Rome. Itali. V. 2. P. 385.

- Нешпор Ю.И., Чаленко Н.Н., Степанян А.А. и др. // Астрон. журн. 2001. Т. 78. С. 291.
- Нешпор Ю.И., Елесеев В.С., Жоголев Н.А., Нехай Е.М., Скирута З.Н., Фиделис В.В., Фомин В.П.
// Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2007. Т. 103. №. 1. С. 27.
- Нешпор Ю.И., Жоголев Н.А., Калекин О.Р., Скирута З.Н., Степанян А.А., Фомин В.П., Шитов В.Г.
// Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2003. Т. 99. С. 34.
- Нешпор Ю.И., Жовтан А.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2008. Т. 104. №. 1. С. 185.
- Нешпор Ю.И., Степанян А.А. // Астрон. журн. 2006. Т. 83. №. 9. С. 771.
- Панч и др. (Panch M., Akerlof C.W., Cawley M.F. et al.) // Proc. of 22nd Intern. Cosm. Ray Conf. 1991. V. 1. P. 464.
- Раппапорт и др. (Rapport S., Clark G.W., Cominsky L. et al.) // Astrophys. Lett. 1978. V. 224. L. 1.
- Роуелл Г., Хорнс Д. (Gavin Rowele, Dieter Horns) // Proc. of 28th Intern. Cosm. Ray Conf. 2003. P. 2345
- Степанян А.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1960. Т. 24. С. 313.
- Степанян А.А., Владимирский Б.М. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1960. Т. 24. С. 320.
- Степанян А.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1962. Т. 28. С. 324.
- Степанян А.А. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1971. Т. 43. С. 42.
- Степанян и др. (Stepanian A.A., Vladimirsky V.M., Fomin V.P.) // Nature. Phys. Sci. 1972. V. 239. P. 40.
- Степанян А.А., Нешпор Ю.И., Андреева Н.А. и др. // Астрон. журн. 2002. Т. 79. С. 702.
- Хоустон, Волфиндейл (Houston V.P., Wolfendale A.W.) // Astron. Astrophys. 1983. V. 126. P. 22.
- Фомин В.П. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1975. Т. 53. С. 59.
- Фомин В.П. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1977. Т. 56. С. 35.