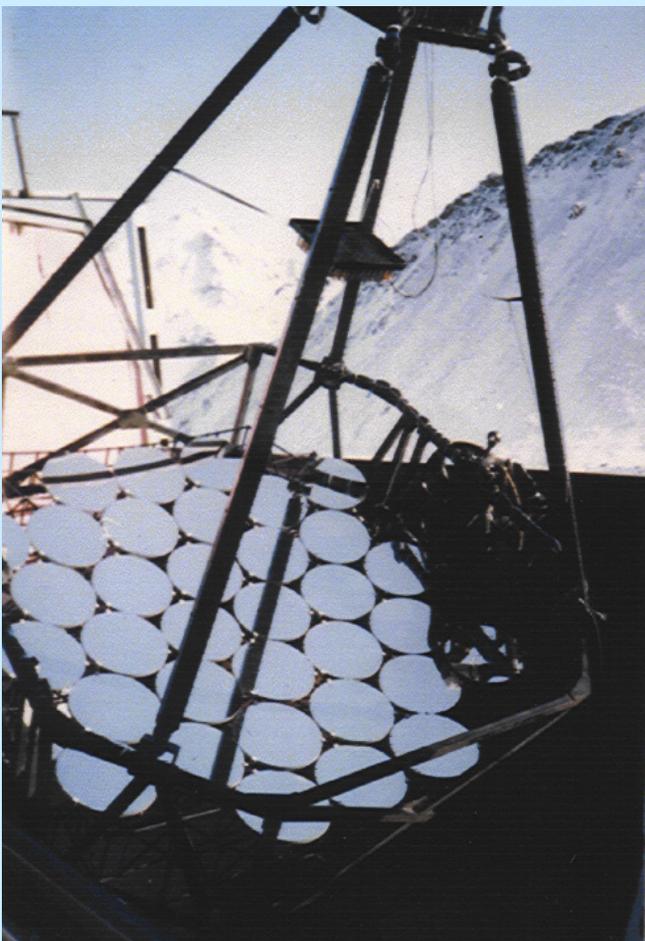




Долговременные исследования
Области Cygnus X
при сверхвысоких энергиях

В.Г. Синицина, В.Ю. Синицина

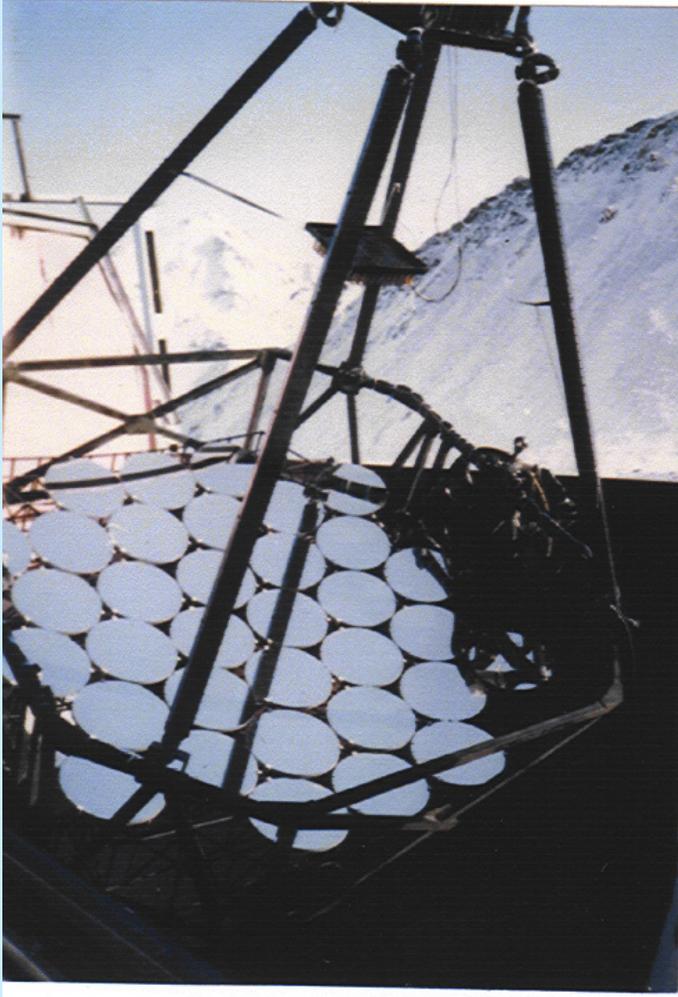
Физический институт им. П.Н. Лебедева



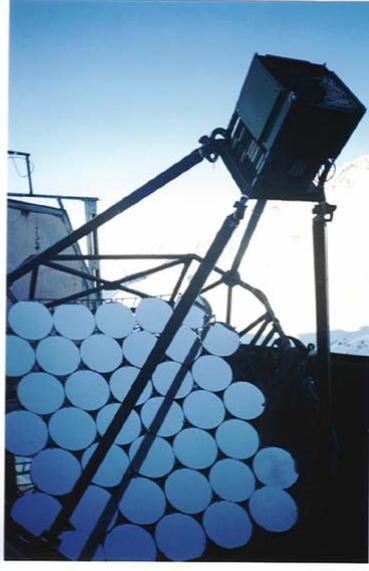


ВЫСОКОГОРНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ ШАЛОН АЛАТОО

Зеркальный гамма-телескоп ШАЛОН является единственным действующим гамма-телескопом Российской Федерации и одной из четырёх телескопических установок в северном полушарии ведущих исследования в ТэВ-ной области энергий.



- Площадь сферического зеркала 11.2 м²
- Радиус кривизны зеркала 8.5 м
- Углы поворота зеркала:
 - азимутальный 0°-360°
 - зенитный 0°-110°
- Точность наведения главной оси ≤0.1°
- Число фотоумножителей 144 (12x12)
- Угол обзора > 8°
- Вес 6 тонн
- Альт-азимутальная монтировка



SHALON-1

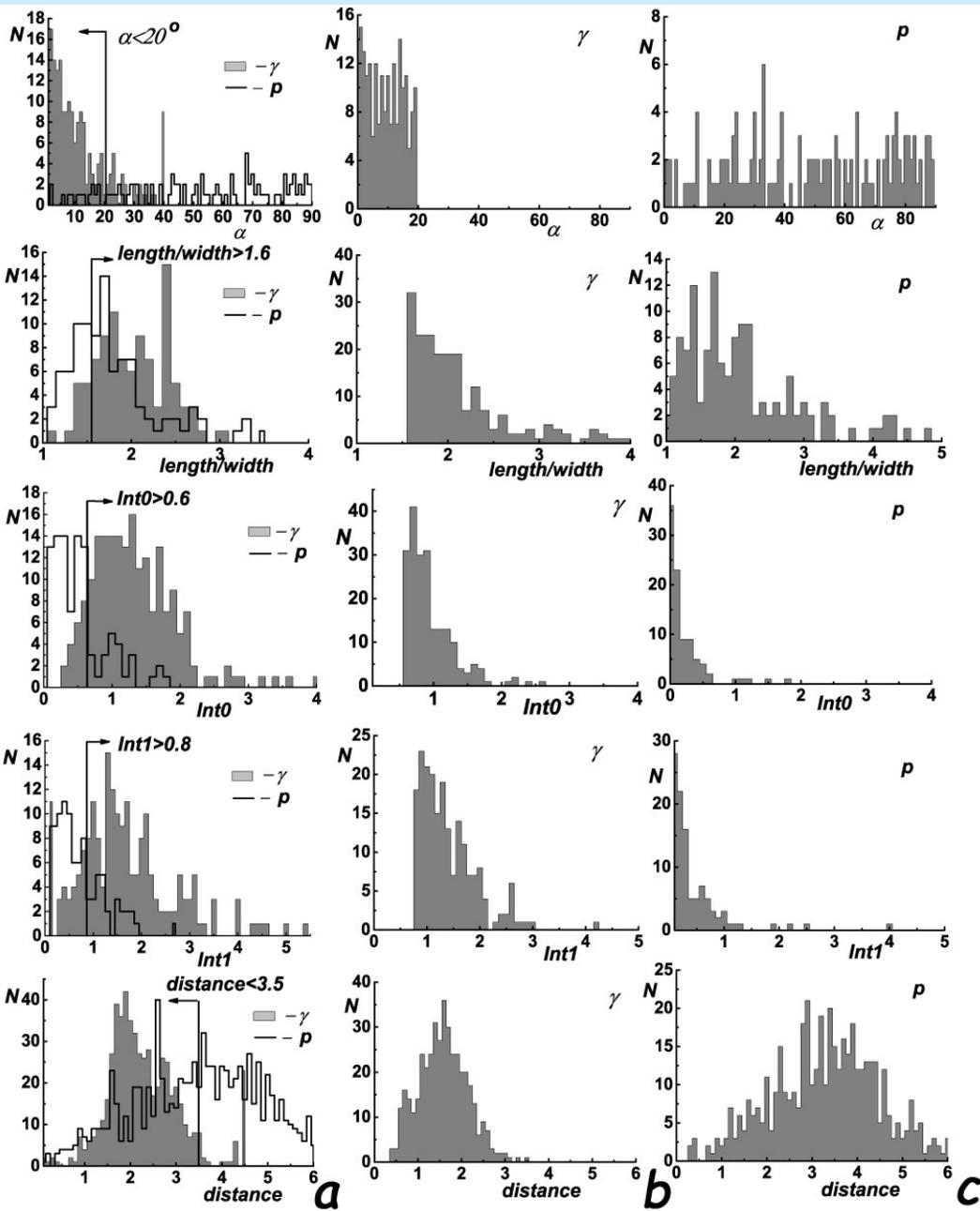


SHALON-2

Выделение гамма-квантов из фона ливней от протонов

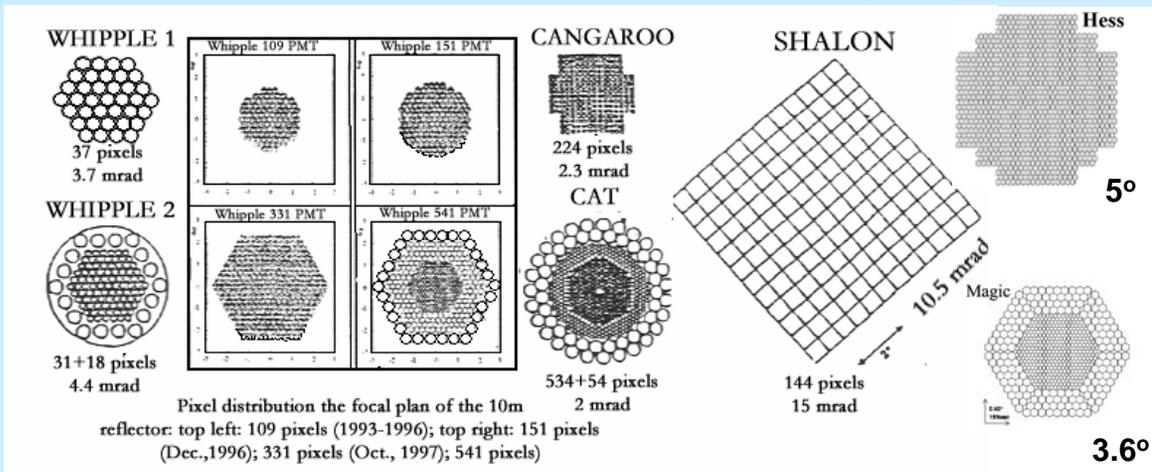
Критерии отбора

- 1) $\alpha < 20^\circ$; отсекает **72%** фона
- 2) $\text{Length/Width} > 1.6$; отсекает **49%** фона
- 3) отношение интенсивности черенковского света в ячейке с наибольшим светом к интенсивности в восьми окружающих ячейках $\text{INT0} > 0.6$; отсекает **92%** фона
- 4) отношение интенсивности черенковского света в ячейке с наибольшим светом к интенсивности во всех остальных ячейках, исключая девять ячеек в центре $\text{INT1} > 0.8$; отсекает **88%** фона
- 5) расстояние между ячейкой, соответствующей направлению на источник и ячейкой с наибольшим потоком меньше 3.5 ячеек ($\text{Distance} < 3.5$) отсекает **50%** фона



Анализ распределений показал, что вклад фоновых – протонных событий в гамма-события составляет не более 10%, т. е. отсекается **99,92%** фона, тогда как потеря гамма-квантов, по проведённым оценкам не превышает **35%**, что учитывается в последующем анализе.

Светоприёмник имеет наибольшие в мире угловые размеры $>8^\circ$. Это позволяет вести контроль фона от заряженных частиц космического излучения и прозрачности атмосферы непрерывно, в процессе наблюдений, а также расширяет площадь наблюдения и, следовательно, эффективность наблюдений. Методика одновременного получения информации о фоне космических лучей и ливнях, инициированных гамма-квантами является уникальной и применяется в эксперименте ШАЛОН с самого начала его работы. Эта методика служит увеличению полезного времени слежения за источником, при этом, что особенно важно, условия наблюдения источника и фона, такие как толщина и состояние атмосферы остаются одинаковыми.

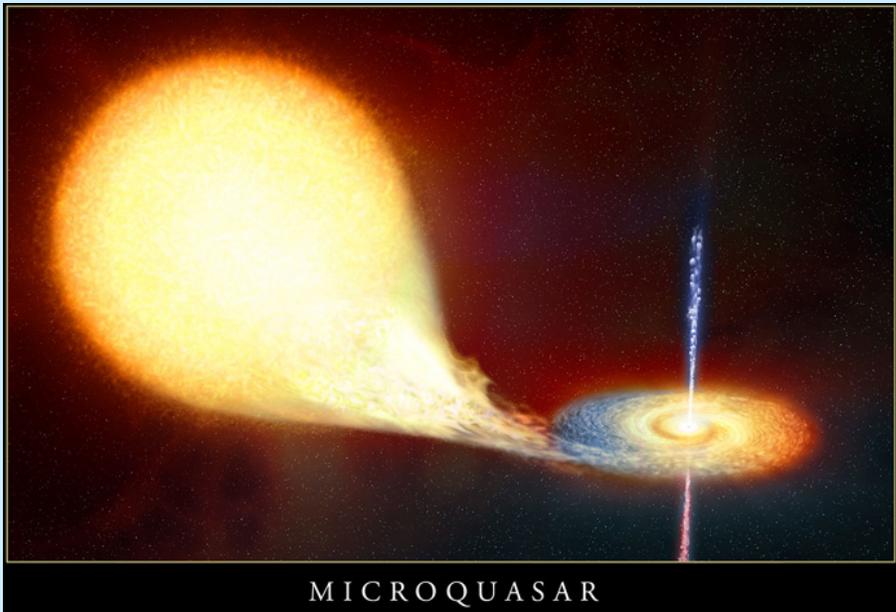


Такой способ недоступен другим гамма-астрономическим экспериментам из-за меньшего поля зрения используемых в мире телескопов. Кроме того, широкий угол обзора позволяет записывать полностью, и практически без искажений, нецентральные ливни, приходящие на расстояниях более 30 м от оси телескопа, количество которых составляет более 90% от всех, регистрируемых телескопом.



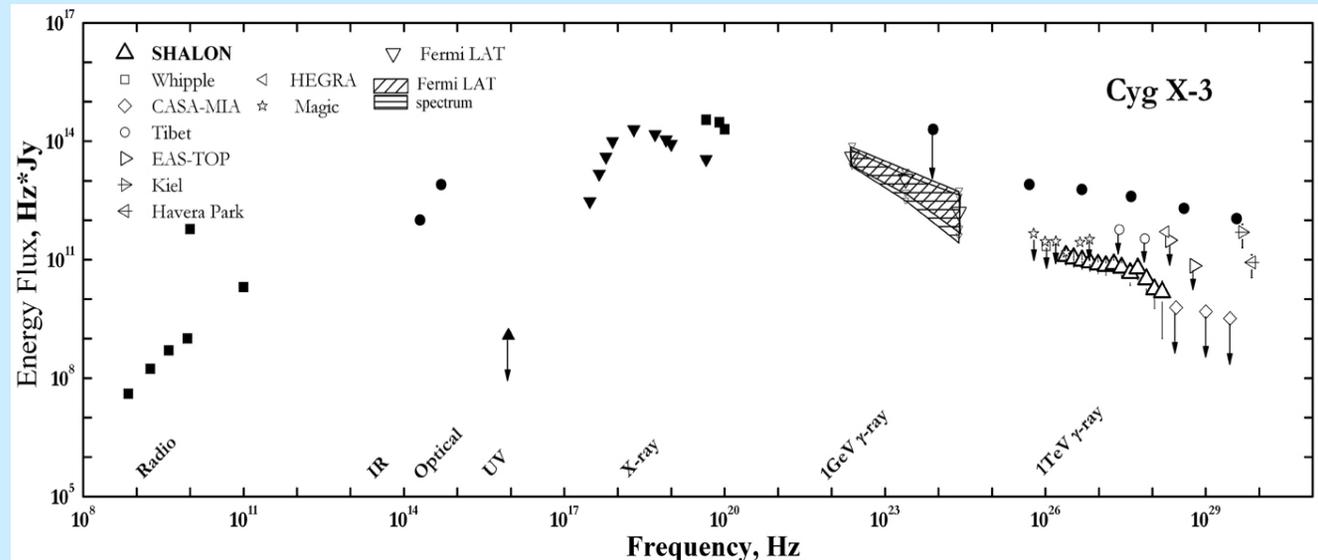
Направление прихода первичной частицы, при первичном анализе, определяется с точностью $< 0.1^\circ$. Дальнейший, разработанный специально для телескопов ШАЛОН и основанный на методе регуляризации Тихонова, анализ улучшает точность определения до величины меньшей 0.01° .

Cygnus X-3



Cygnus X-3 – пекулярная двойная рентгеновская система открытая более 40 лет. Этот объект наблюдается во всём диапазоне электромагнитного спектра. Это один из наиболее ярких рентгеновских источников, проявляющий как быструю переменность, так и длительные периоды высокой и низкой интенсивности излучения. Также он является наиболее сильным источником радио излучения среди рентгеновских двойных систем; обнаруживает и гигантские радио выбросы и релятивистские джеты. При этом активность в радио диапазоне тесно связана с рентгеновским излучением на различных периодах. Основываясь на регистрации высокоэнергичных гамма-лучей, было высказано предположение о том, что Cyg X-3 может быть одним из наиболее мощных источников заряженных частиц космических лучей в Галактике.

Спектральное энергетическое распределение гамма-излучения от Cyg X-3. Δ — данные наземного черенковского телескопа ШАЛОН (за период 1995 – 2012 гг.) в сравнении с данными других экспериментов: TIBET, HEGRA, EAS-TOP, Whipple, CASA-MIA, Kiel, Haveria Park. Чёрные точки представляют архивные данные из Cordova, (1986).



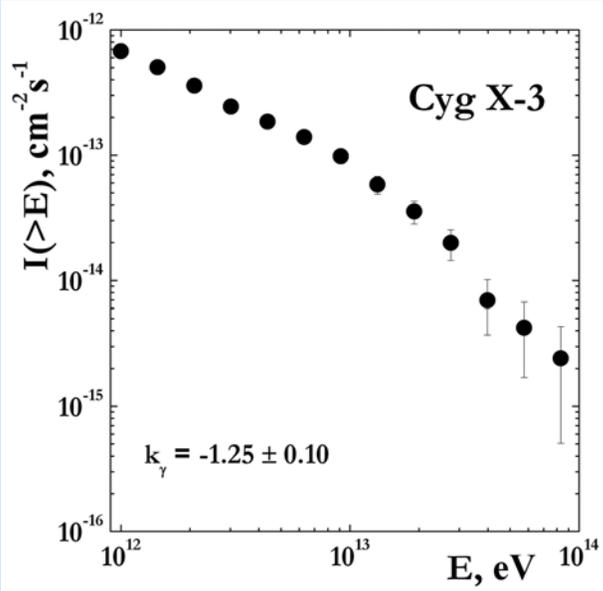
Cygnus X-3

На высокогорном (3340 м) зеркальном черенковском телескопе ШАЛОН ведутся уникальные долговременные наблюдения массивной двойной системы Cyg X-3. Рентгеновская двойная система Cyg X-3, систематически наблюдается телескопом ШАЛОН с 1995 года (всего 267 часов) со средним значением потока γ -квантов:

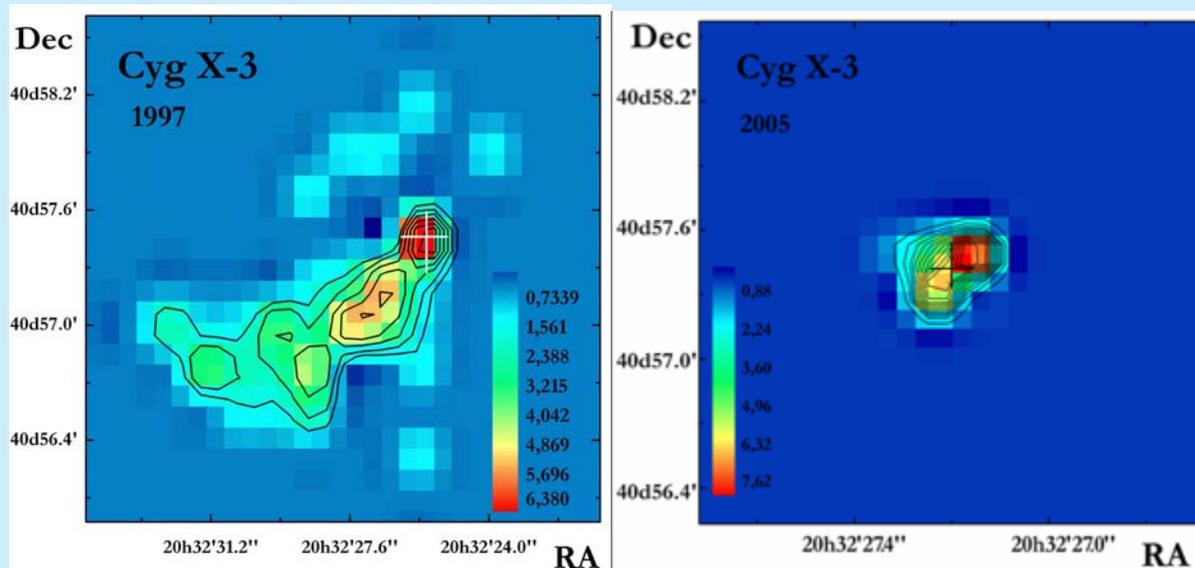
$$F(E_0 > 0.8 \text{ ТэВ}) = (6,8 \pm 0,5) \times 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}.$$

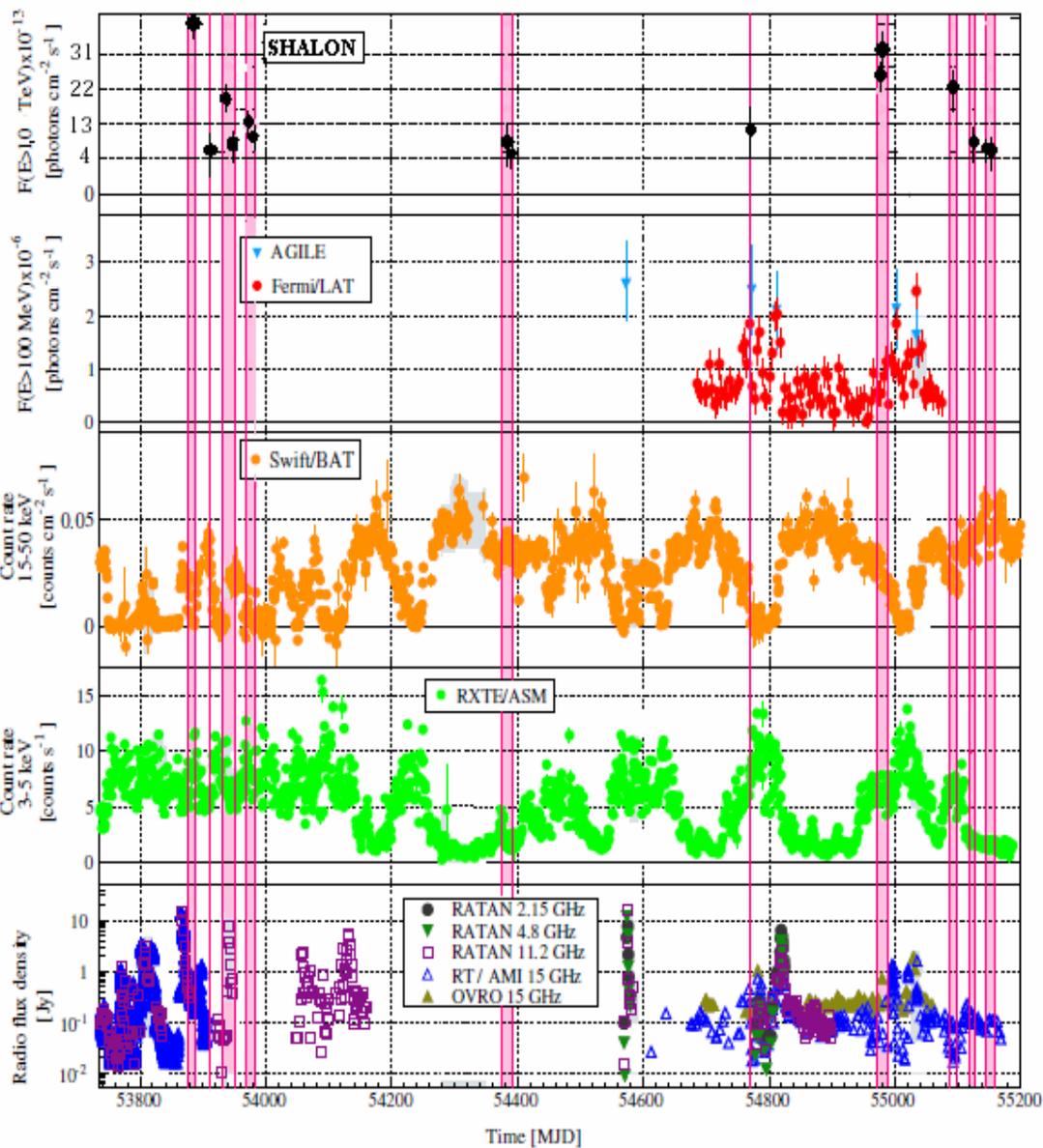
Достоверность регистрации Cyg X-3 телескопом ШАЛОН при энергиях больше 0.8 ТэВ составляет 32.8σ по определению Li&Ma. Энергетический спектр γ -квантов в наблюдаемом диапазоне энергий от 0,8 ТэВ до 85 ТэВ хорошо описывается единым степенным законом $F(E_0 > 0,8 \text{ ТэВ}) \sim E^{\kappa_\gamma}$, где $\kappa_\gamma = -1,25 \pm 0.10$.

Для сравнения приведены изображения Cyg X-3 в спокойный период 2005 года и в период вспышки 1997 года.



По данным наблюдений телескопом ШАЛОН при вспышках были обнаружены выбросы-джеты, напоминающие джеты квазаров и активных галактик. Последние повышения потока источника были отмечены в мае 2009 года и октябре 2011, которые коррелировали с активностью Cyg X-3 в области низких энергий в рентгене и, наблюдаемой при высоких энергиях телескопом Fermi LAT. Ранее, в 1997, 2003 и 2006 годах, были обнаружены сопоставимые увеличения потока γ -квантов сверхвысоких энергий.

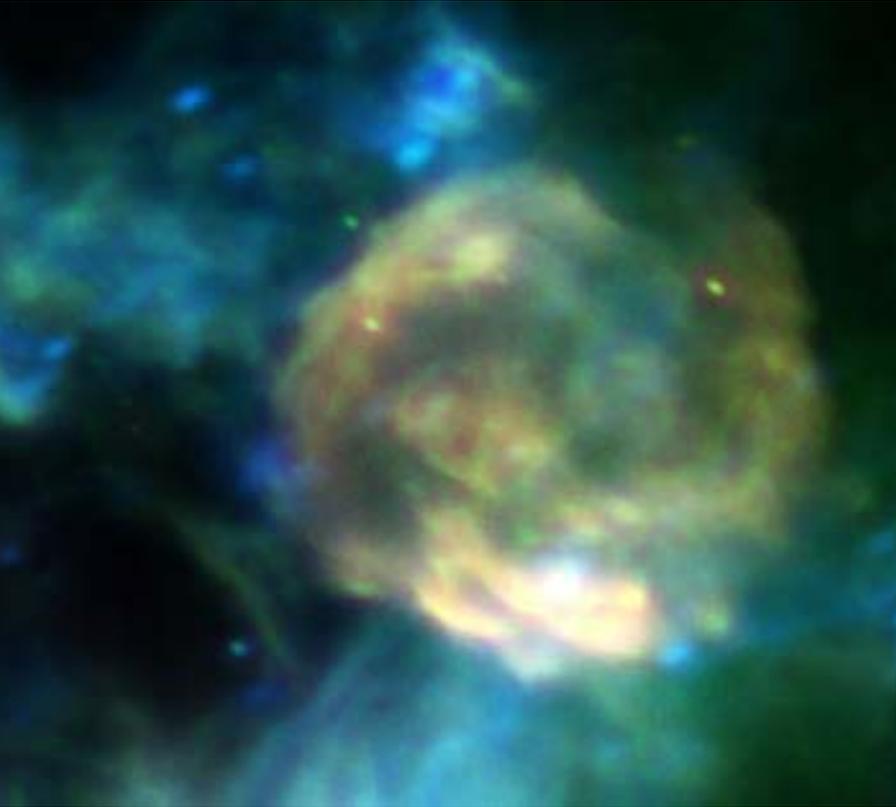




В результате, за весь период наблюдений объекта Cyg X-3 телескопом ШАЛОН было отмечено восемь повышений потока γ -квантов с энергиями выше 0,8 ТэВ. Для выявления возможных корреляций вспышек при сверхвысоких энергиях с поведением источника в других диапазонах энергий, были совместно проанализированы доступные световые кривые Cyg X-3, за период с 2005 по 2009 гг., в жёстком (15 – 50 кэВ, Swift/BAT), мягком (3 – 5 кэВ, RXTE/ASM) рентгеновских диапазонах, а также в радиодиапазоне 2,15, 4,8, 11,2 ГГц (РАТАН), 15 ГГц (RT/AMI и OVRO).

Обнаружена антикорреляция уровня жёсткого рентгеновского потока и потока γ -квантов сверхвысоких энергий в периоды перечисленных вспышек, при этом, наблюдается корреляция мягкого рентгеновского и ТэВ-ого γ -излучения. Было отмечено, что вспышки активности Cyg X-3 в диапазоне энергий выше 0,8 ТэВ, происходят близко, в пределах 4 - 5 дней, к радиовспышкам. По-всей видимости, такое поведение связано с мощными выбросами масс из центральных областей вокруг черной дыры, сопровождающимися распространением релятивистских ударных волн, в которых происходит быстрая и эффективная генерация релятивистских электронов и магнитных полей. Подобное описанному поведению потока γ -квантов сверхвысоких энергий по отношению к активности в диапазоне мягкого рентгеновского излучения и радиодиапазоне было обнаружено и в период активности 1997 года. Увеличение потока γ -квантов с энергией $>0,8$ ТэВ в 2003 году не укладывается в эту схему: оно происходило в спокойный, в диапазоне 3 – 5кэВ, период. В среднем, корреляция потоков γ -квантов сверхвысоких энергий и в диапазоне мягкого рентгеновского излучения прослеживается за весь период наблюдений на телескопе ШАЛОН с 1996 (данные ASM доступны с 1996 года).

γ Cygni SNR

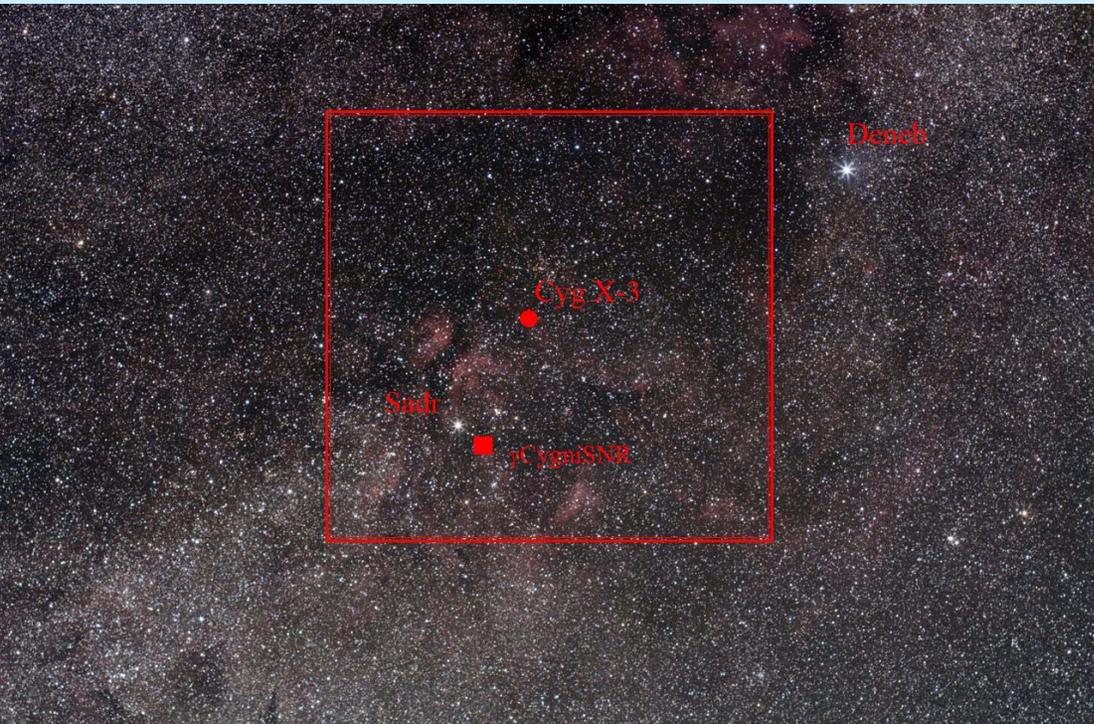


γ Cygni SNR – близкий остаток сверхновой оболочечного типа (1 – 2 кпк), который имеет угловые размеры $\sim 1^\circ$ и оболочечную структуру, видимую в радио и рентгеновском диапазоне энергий. γ Cygni SNR существенно старше таких остатков сверхновых как Cas A и Tycho's SNR, его возраст оценивается как 5000 – 7000 лет и, предположительно, ОЧН γ Cygni находится на стадии раннего адиабатического расширения. Наблюдения остатков сверхновых на разных этапах эволюции могут помочь в установлении механизмов ускорения космических лучей до энергий вплоть до 10^{15} эВ.

Область Лебеда (Cygnus-X), к которой относится и описанная двойная система Cyg X-3, содержит ряд потенциальных источников ГэВ-ого и ТэВ-ого излучения, некоторые из которых были обнаружены при высоких энергиях телескопом Fermi LAT (2009 - 2013) и ранее телескопом EGRET (1995, 1996), а также при сверхвысоких энергиях установкой Milagro (2011) и черенковскими телескопами Whipple (1998) и HEGRA (1996).

The radio astronomy image of γ Cygni SNR, from the Canadian Galactic Plane Survey (CGPS)

γ Cygni SNR



В поле зрения телескопа ШАЛОН, на расстоянии $\sim 2^\circ$ на юго-запад от Cyg X-3, находится известный источник радио и рентгеновского излучения, остаток сверхновой (ОСН) γ Cygni SNR (или G78.2+2.1). Таким образом, благодаря большому полю зрения телескопа ШАЛОН ($>8^\circ$), наблюдения Cyg X-3 автоматически сопровождаются наблюдениями ОСН γ Cygni.

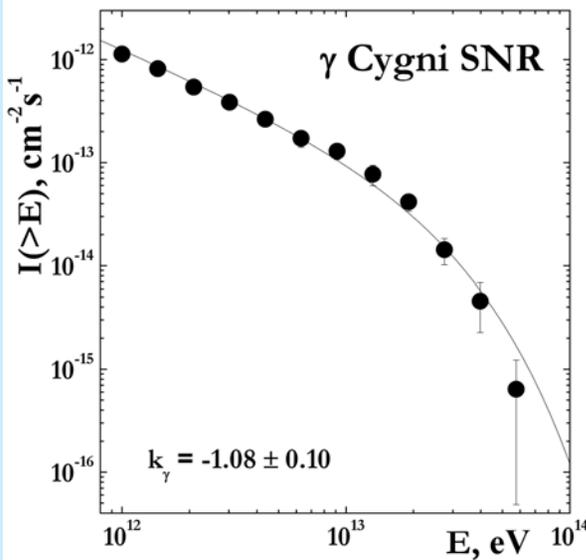
Поле зрения телескопа ШАЛОН при наблюдениях Cyg X-3

Как источник, сопровождающий Cyg X-3, γ Cygni SNR систематически наблюдается телескопом ШАЛОН с 1995 по настоящее время (260 часов). Среднее значение потока при энергиях больше 0,8 ТэВ для γ Cygni SNR составляет :

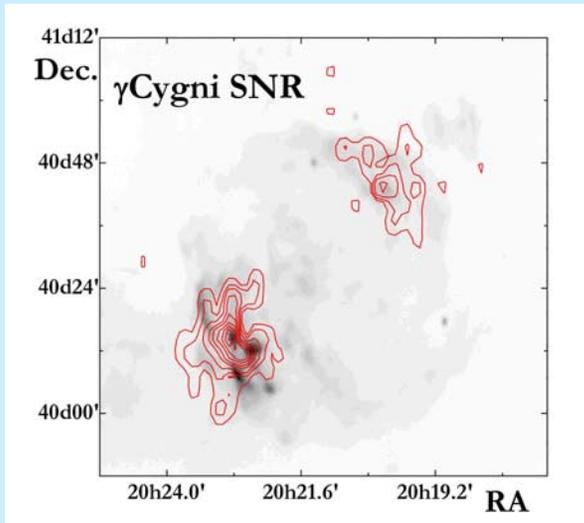
$$I_{\gamma\text{Cygni SNR}}(>0,8\text{TeV}) = (1,27 \pm 0,11) \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$$

γ Cygni SNR

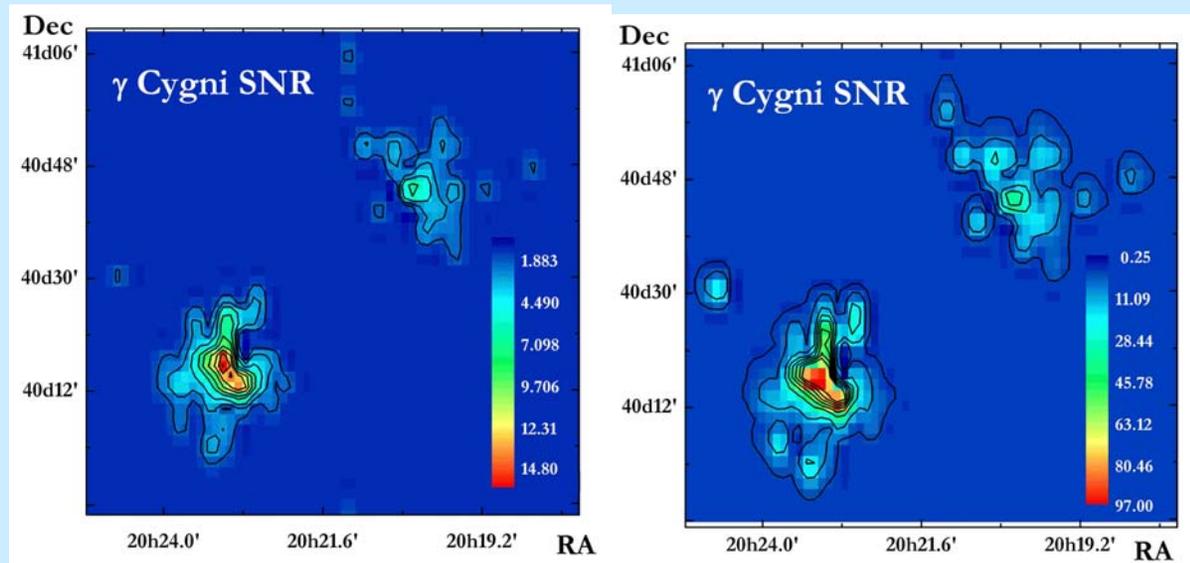
Наблюдения проводились по стандартной для телескопа ШАЛОН методике получения информации о фоне космических лучей и ливнях, инициированных γ -квантами, в одном и том же сеансе наблюдений. При обработке данных наблюдений, γ Cygni SNR был зарегистрирован телескопом ШАЛОН при энергиях больше 0.8 ТэВ на уровне 14σ определяемом по Li&Ma. Достоверность регистрации в данном случае ниже, чем у источников с данным потоком и спектром за указанное количество часов наблюдений, т.к. источник наблюдался в меньшем эффективном поле зрения по сравнению со стандартной процедурой наблюдения источников в эксперименте ШАЛОН. Соответствующие поправки на эффективное поле зрения внесены при определении характеристик источника. При обработке данных наблюдений Cug X-3 по критериям отбора относительно самого Cug X-3 и с привязкой к γ Cygni SNR, количество γ -ливней общих и для первого и второго источника составило 2,4%. Распознавание принадлежности общих ливней к каждому из перечисленных источников произведено по определению углового расстояния между направлением прихода ливня и координатами источника. В результате количество γ -ливней от Cug X-3 уменьшилось на $\sim 1\%$, что не меняет величину приведённого выше потока γ -излучения от источника.



The γ -ray integral spectrum by SHALON at energies 0.8 – 28 TeV is compatible with a power law: $I(>E_\gamma) \propto E_\gamma^{-1.08 \pm 0.10}$

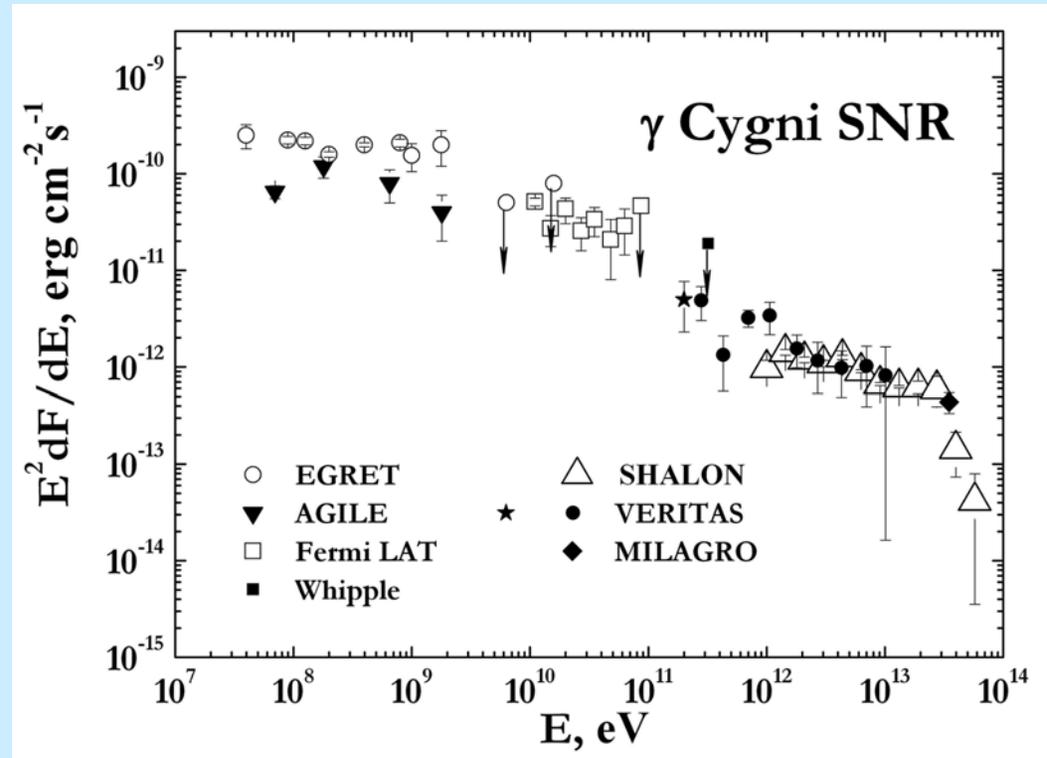


Radio image of γ Cygni SNR (CGPS); The contour lines show the TeV-image by SHALON



The images of γ Cygni SNR by SHALON

γ Cygni SNR



В области высоких энергий, данные по γ Cygni SNR, были получены, в разные годы, на спутниковых экспериментах EGRET в 1995, Fermi LAT (2009-2011) AGILE 2010; на наземном телескопе VERITAS (см. ★) при энергии 200 ТэВ был зарегистрирован протяжённый источник VERJ2019+407 коррелирующий с положением северной части оболочки ОСН. При сверхвысоких энергиях ~ 35 ТэВ, излучение из области ОСН было обнаружено на установке MILAGRO (2011). На рис. представлено сравнение спектрального энергетического распределения γ Cygni SNR по данным телескопов ШАЛОН (1995–2012), EGRET (1995), AGILE (2010), Fermi LAT (2009–2011) и VERITAS (2009), MILAGRO (2011).

Результаты исследований γ Cygni SNR, полученные телескопом ШАЛОН, были подтверждены в наблюдениях наземным черенковским телескопом VERITAS

Энергетический спектр γ -квантов остатка сверхновой γ Cygni в наблюдаемом диапазоне энергий от 0,8 ТэВ до 50 ТэВ хорошо описывается степенным законом с экспоненциальным обрезанием :

$$I(>E_\gamma/1\text{ТэВ}) = (1,12 \pm 0,11) \times 10^{-12} \times (E_\gamma/1\text{ТэВ})^{-0,93 \pm 0,09} \exp(-E_\gamma/20\text{ТэВ})$$

Заключение

Область Лебедя (Cygnus X) содержит ряд мощных источников радио и рентгеновского излучения, которые также рассматривают как потенциальные источники излучения высоких и сверхвысоких энергий. Одним из таких источников является массивная двойная система Cyg X-3, систематически наблюдаемая на телескопе ШАЛОН с 1995 года по настоящее время. Результаты наблюдений Cyg X-3 представлены спектрами γ -излучения и изображениями при энергиях 800 ГэВ – 85 ТэВ. В поле зрения телескопа ШАЛОН, был обнаружен источник γ -излучения сверхвысоких энергий, располагающийся в $\sim 2^\circ$ от Cyg X-3 по своим координатам совпадающий с известным источником радио и рентгеновского излучения – остатком сверхновой γ Cygni SNR. Представлены спектры, спектральное энергетическое распределение и изображение γ Cygni SNR по данным телескопа ШАЛОН в диапазоне энергий 800 ГэВ – 50 ТэВ.

