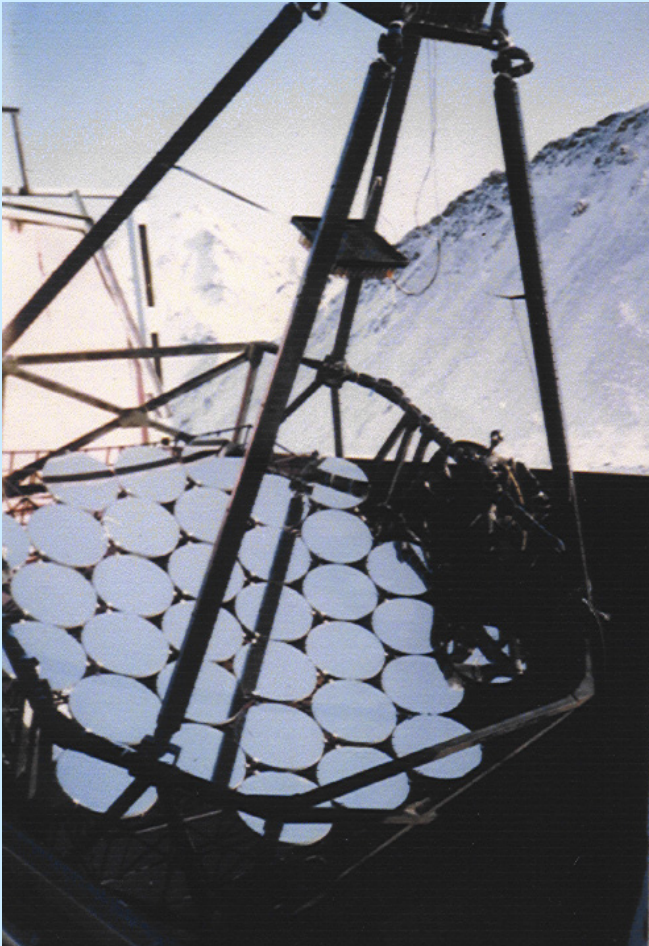




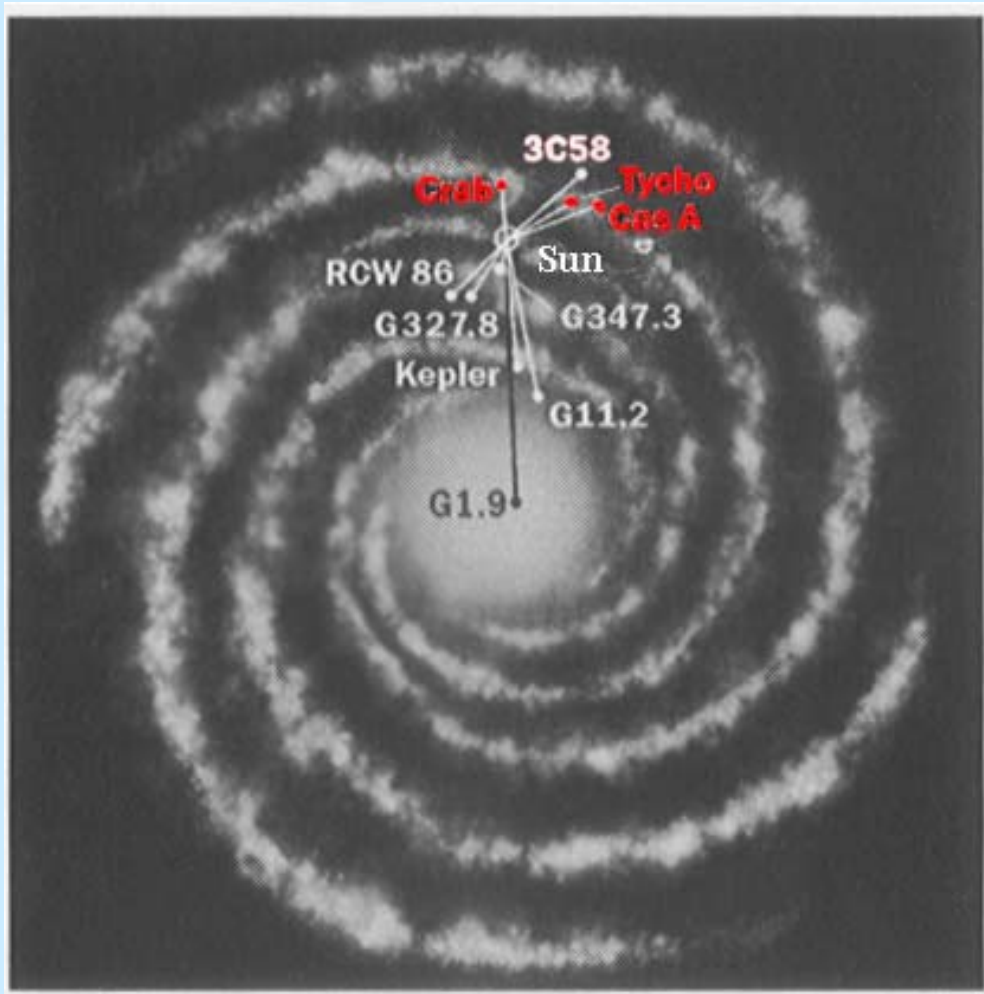
Остатки сверхновых оболочечного типа
как источники космических лучей в
нашей Галактике

В.Г. Синицина, В.Ю. Синицина

Физический институт им. П.Н. Лебедева



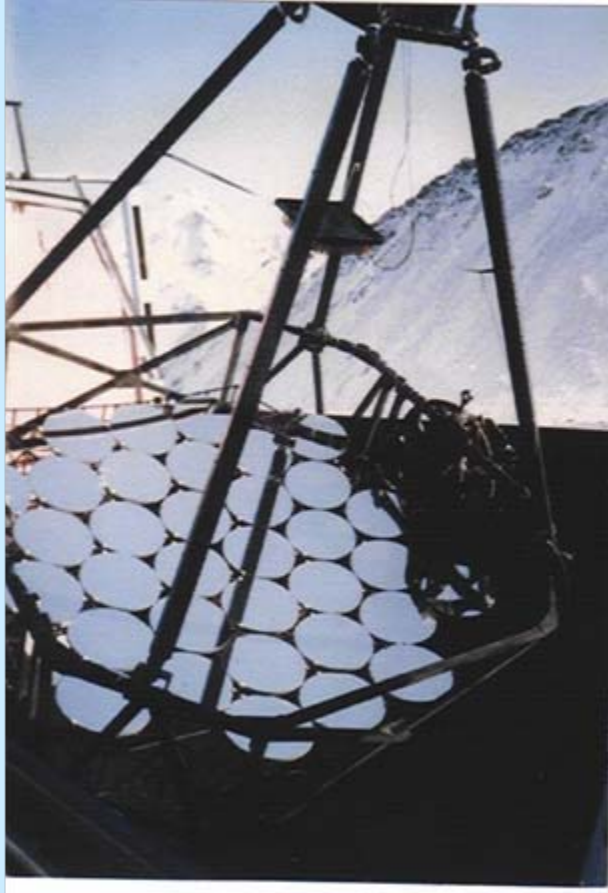
Исторические остатки сверхновых



Position of the supposed supernova remnants exploded in the last 2000 years in the Galaxy disk

Информация о распределении космических лучей в остатках сверхновых может быть получена из гамма-астрономических наблюдений, поскольку, гамма-кванты сверхвысоких энергий генерируются электронной и адронной компонентами космических лучей в обратном комптоновском рассеянии и в столкновении адронов, приводящих к рождению π^0 -мезонов с последующим их распадом.

TeV GAMMA-RAY EMISSION from GALACTIC SOURCES



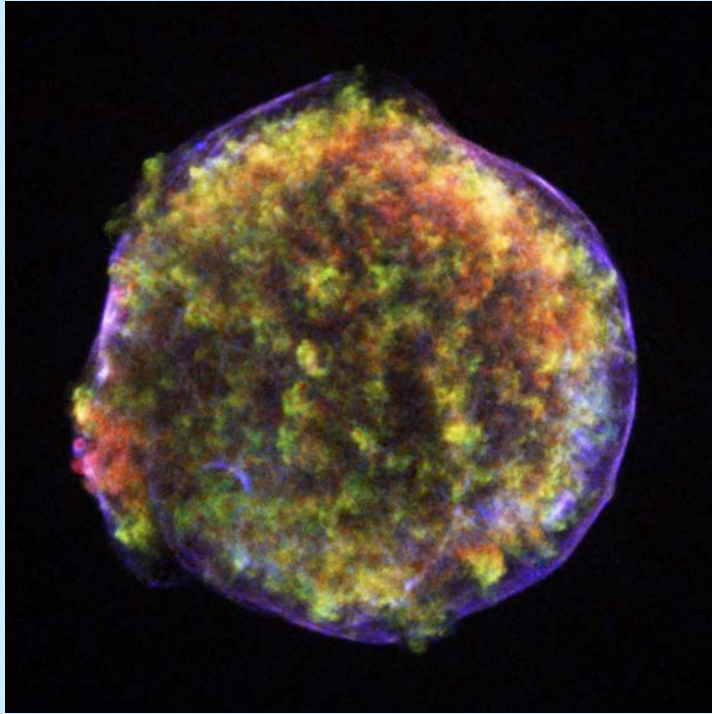
Одной из основных задач гамма-астрономии сверхвысоких энергий является обнаружение и исследование объектов в Галактике и за ее пределами, где ускоряются космические лучи, а также изучение механизмов генерации элементарных частиц в активных астрофизических объектах. С самого начала физики космических лучей широко распространена гипотеза о том, что остатки сверхновых являются уникальными кандидатами в источники космических лучей (Березинский и др., 1984; Рейнольдс, 2008; Бережко, Крымский, 1988). Результаты недавних наблюдений нескольких остатков сверхновых в рентгеновских и ТэВ-ных гамма-лучах помогут в решении проблемы происхождения космических лучей, и являются ключевыми для понимания механизма ускорения частиц на распространяющейся ударной волне.

SNRs observed by SHALON at energies > 800 GeV

Sources	Type	Observable flux, ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Distance, (kpc)
Crab Nebula	Plerion	$(2.12 \pm 0.11) \times 10^{-12}$	2
* Geminga	Radioweak pulsar/PWN	$(0.48 \pm 0.07) \times 10^{-12}$	0.25
*3c58(SN1181)	Plerion	$(0.54 \pm 0.15) \times 10^{-12}$	2.6 - 3.2
*Tycho's SNR	Shell type SNR	$(0.52 \pm 0.04) \times 10^{-12}$	2.5 - 3.5
Cas A	Shell type SNR	$(0.74 \pm 0.09) \times 10^{-12}$	3.1
IC 443	Shell type SNR	$(1.69 \pm 0.58) \times 10^{-12}$	1.5
γ Cygni SNR	Shell type SNR	$(1.27 \pm 0.11) \times 10^{-12}$	1.5

* источники впервые обнаруженные телескопом ШАЛОН при энергиях выше 800 ГэВ

Tycho's SNR (1572yr)



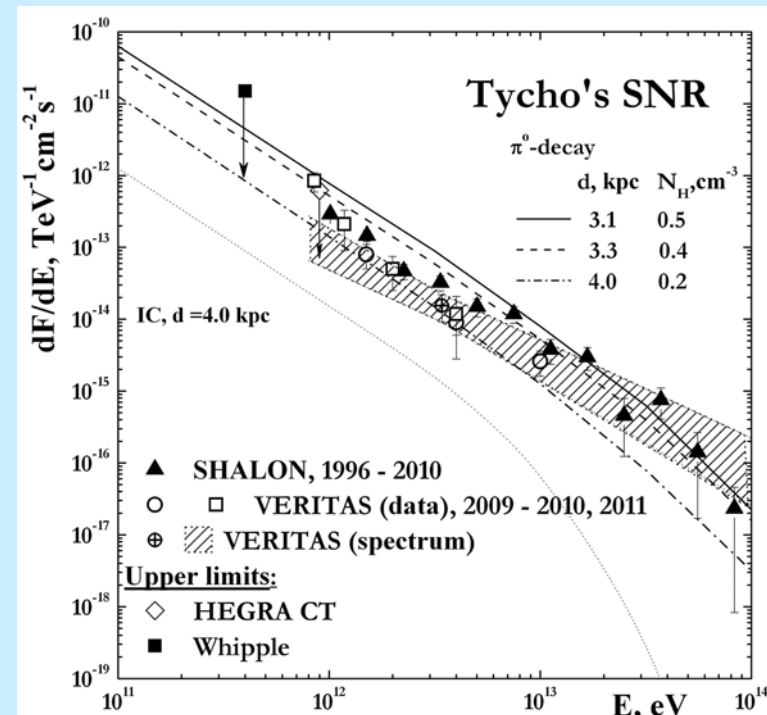
Кинетическая нелинейная теория ускорения космических лучей в сверхновых связывает газодинамику взрыва с ускорением частиц. В работе [Бережко, Voeck], для описания свойств остатка сверхновой Тихо Браге использовалась нелинейная кинетическая модель ускорения космических лучей в остатках сверхновых.

Ожидаемый от распада π^0 поток γ -квантов $F_\gamma \sim E_\gamma^{-1}$ простирается до ~ 30 ТэВ, тогда как поток γ -квантов генерируемый процессом обратного комптоновского рассеяния обрезается выше нескольких ТэВ. Поэтому, обнаружение гамма-излучения при энергиях 10 – 80 ТэВ телескопом ШАЛОН является свидетельством адронного происхождения.

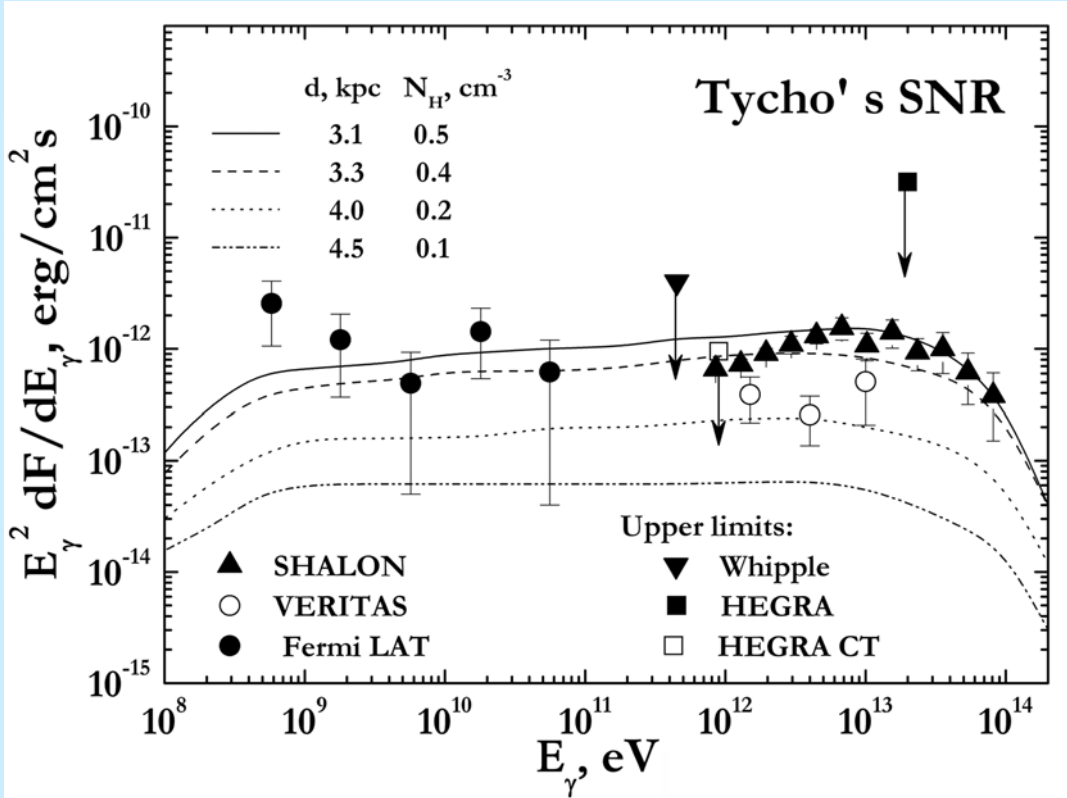
Этот объект уже давно рассматривается как кандидат в источники адронов космических лучей в Северном Полушарии. Остаток сверхновой Тихо был зарегистрирован телескопом ШАЛОН при энергиях больше 0.8 ТэВ с интегральным потоком: $(0.52 \pm 0.04) \times 10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. на уровне 17σ определяемом по методу Li&Ma. Энергетический спектр гамма-квантов остатка сверхновой Тихо наблюдаемый телескопом ШАЛОН в диапазоне энергий от 0,8 до 80 ТэВ хорошо описывается степенным законом с экспоненциальным обрезанием :

$$I(>E_\gamma) = (0.48 \pm 0.04) \times 10^{-12} \times E_\gamma^{-0.93 \pm 0.09} \exp(-E_\gamma/35 \text{ TeV})$$

Недавно ОСН Тихо также был обнаружен телескопом VERITAS в наблюдениях 2008 - 2010 годов.



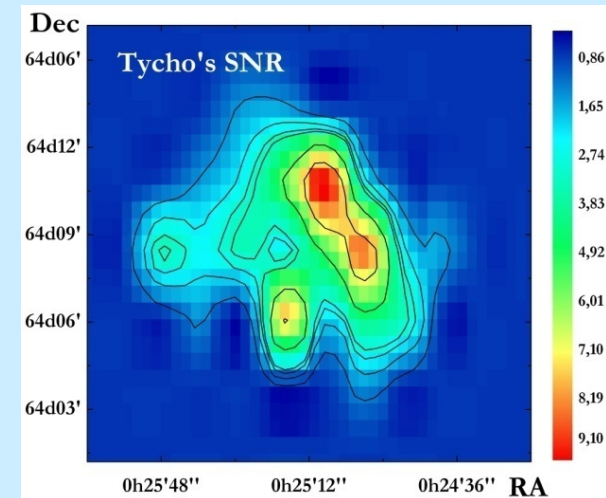
Tycho's SNR



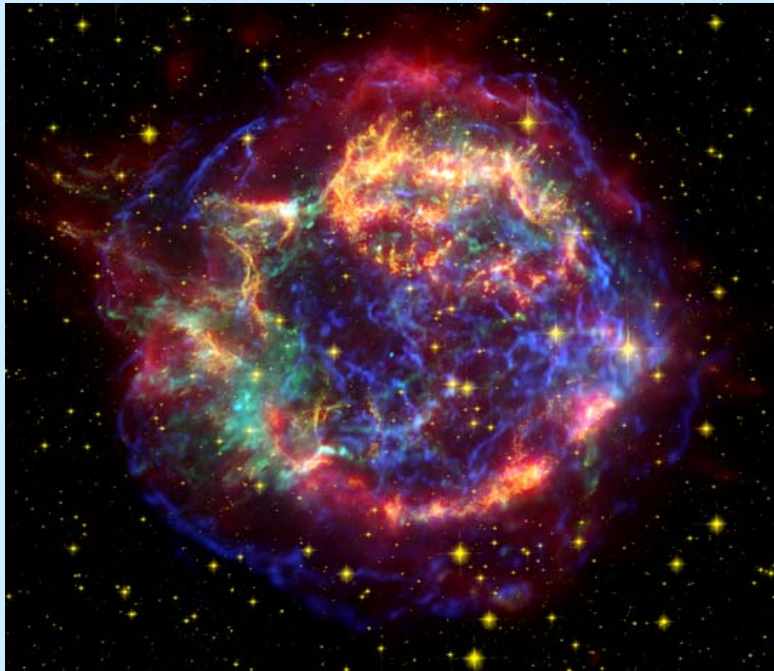
На рисунке представлено спектральное энергетическое распределение гамма-квантов от Тихо Браге рассчитанное в предположении энергии взрыва сверхновой равной $E_{SN} = 1.2 \times 10^{51}$ эрг для четырёх расстояний d и соответствующих плотностей межзвёздной среды N_H . Дополнительная информация о параметрах источника Тихо Браге получена в рамках нелинейной кинетической теории из данных телескопа ШАЛОН: расстояние d находится в пределах 3.1 – 3.3 кпк, плотность межзвёздной среды $N_H = 0.4 - 0.5 \text{ см}^{-3}$, при этом поток гамма-квантов от распада π^0 будет простирается почти до 100 ТэВ.

Recently, Tycho's SNR was also detected at GeV energy range by Fermi LAT (●) (2010, 2011). The Tycho's SNR spectral energy distribution by SHALON (▲) (1996 - 2010) comparing with VERITAS (○) (2009), Fermi LAT (●) (2010, 2011) and theoretical models [Volk H.J. Berezhko E.G. Ksenofontov L.T., 2008].

The image of Tycho's SNR by SHALON



Cassiopeia A (1680 yr.)



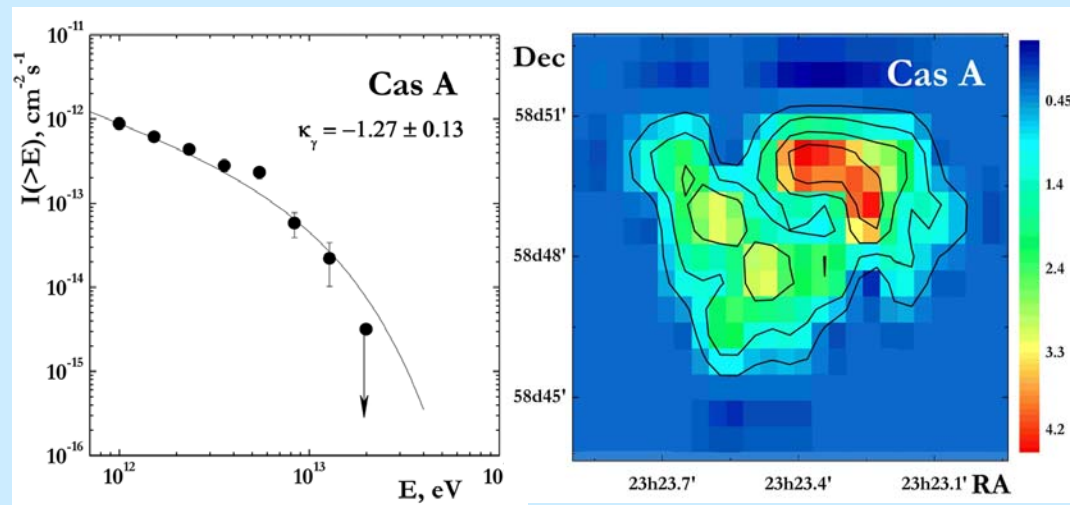
Кассиопея А (Cas А) самый молодой из исторических остатков сверхновых в нашей Галактике. Яркость излучения Кассиопеи А во всём наблюдаемом электромагнитном спектре делает этот источник уникальным объектом для изучения явлений в остатках сверхновых при высоких и сверхвысоких энергиях. Впервые Cas А был обнаружен в ТэВ-ном диапазоне энергий телескопом HEGRA (2001) и, позднее, подтверждён телескопами MAGIC (2007) и VERITAS (2010). При высоких энергиях от 500 МэВ до 50 ГэВ излучение от Cas А было открыто в эксперименте Fermi LAT (2010).

The composite image of Cas A SNR.

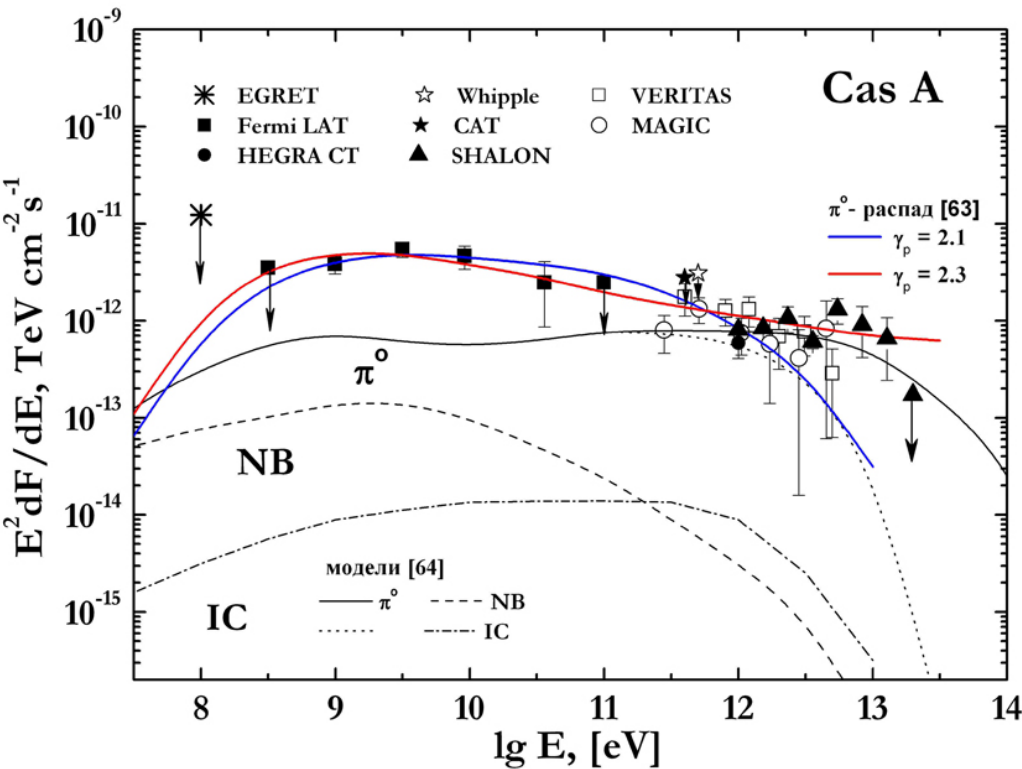
Infrared data from the Spitzer Space Telescope are colored red;
Optical data from the Hubble Space Telescope are yellow;
X-ray data from the Chandra Observatory are green and blue.

Кассиопея А наблюдалась телескопом ШАЛОН 68 часов с 2010 по 2013 годы в ясные безлунные ночи под зенитными углами от 13 до 35 градусов. Кассиопея А была зарегистрирована телескопом ШАЛОН при энергиях больше 0,8 ТэВ на уровне $13,2\sigma$ определяемом по методу Li&Ma. Среднее значение потока при энергиях больше 0.8 ТэВ для Кассиопея А, по данным телескопа ШАЛОН, составляет:

$$I_{CasA}(>0,8\text{TeV}) = (0,64 \pm 0,10) \cdot 10^{-12} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$



Cassiopeia A

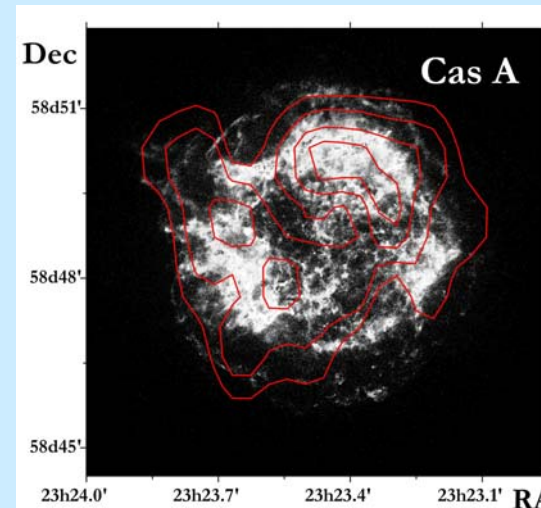


Для описания спектра γ -излучения Cas A, наблюдаемого в диапазоне энергий 500 МэВ – 10 ТэВ, рассматриваются два основных механизма генерации γ -квантов высоких и сверхвысоких энергий: обратное комптоновское рассеяние и распад нейтральных пи-мезонов, рождённых в столкновениях ядер космических лучей с межзвёздным газом. Сплошными линиями показаны спектры в случае адронного происхождения γ -излучения сверхвысоких энергий. Штрих-пунктирная кривая представляет собой спектр γ -квантов полученный в процессе от обратного комптоновского рассеяния. Поток γ -лучей рождённых в процессе обратного комптоновского рассеяния при $B = 0,3$ мГ имеет значения в $\sim 5 - 8$ раз меньше наблюдаемого в экспериментах; при $B = 0,12$ мГ спектр γ -излучения имеет обрезание при энергиях порядка 10 ТэВ.

The spectral energy distribution of the γ -ray emission from Cas A by SHALON (\blacktriangle) in comparison with other experiment data Fermi LAT, HEGRA, MAGIC, VERITAS, EGRET, CAT, Whipple and with theoretical predictions [Abdo A A et al. 2010; Berezhko E G, Pühlhofer G, Völk H J, 2003].

Обнаружение гамма-излучения от Кассиопеи А при энергиях $\sim 5 - 15$ ТэВ и жесткий спектр при энергиях < 1 ТэВ свидетельствует в пользу адронного происхождения гамма-излучения в Кассиопее А

Chandra image of Cas A (X-ray);
The contour lines show the TeV-image by SHALON



IC 443 age of $(3 \div 30) \times 10^3 \text{ yr.}$



The composite image of IC 443 SNR.

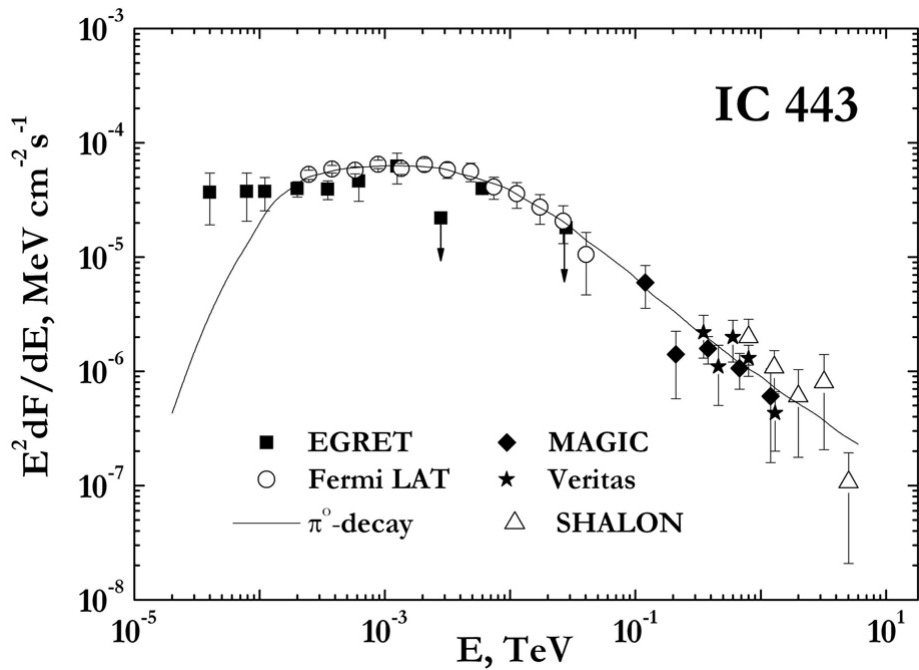
Radio data from the Dominion Radio Astrophysical Observatory are colored green;

Optical data from the Digitized Sky Survey are red;

X-ray data from the Chandra X-ray Observatory are blue.

Остаток сверхновой (ОСН) IC 443 является известным источником радио, оптического, рентгеновского и МэВ – ТэВ-ого γ -излучения. IC443 это остаток сверхновой оболочечного типа, имеющий угловой размер $\sim 45'$ в радиодиапазоне. Он имеет сложную структуру и состоит из двух оболочек-сегментов разного радиуса. Возраст этого остатка не определён: некоторые оценки указывают на то, что это молодой ОСН с возрастом $\sim (3-4) \times 10^3 \text{ у}$, другие склоняются к тому, что он старше, и возраст составляет $(20-30) \times 10^3 \text{ у}$. IC 443 является одним из ОСН, который наилучшим образом подходит для исследования связи между остатками сверхновых, молекулярными облаками и источниками гамма-квантов высоких и сверхвысоких энергий. Последние наблюдения дали указание на то, что IC 443 взаимодействует с окружающим остаток сверхновой межзвёздным веществом. Близкое расположение плотных выметаемых молекулярных облаков и областей излучения ГэВ-ТэВ-ных гамма-лучей, зарегистрированных EGRET, Fermi LAT, MAGIC и VERITAS позволяет рассматривать этот остаток сверхновой в качестве источника космических лучей.

Остаток сверхновой IC 443



IC 443 was detected in TeV *gamma*-rays, first by MAGIC (2007) and later confirmed by VERITAS (2009) and SHALON (2011). The high energy *gamma*-ray emission from IC 443 was detected with EGRET (1995) and then with Fermi LAT (2010) in the range 500 MeV - 50 GeV.

Для описания спектра гамма-излучения IC443, наблюдаемого в диапазоне энергий 100 МэВ – 4 ТэВ, распад нейтральных пи-мезонов, рождённых в столкновениях ядер космических лучей с межзвёздным газом рассматривается как основной механизм генерации гамма-квантов высоких и сверхвысоких энергий. (Обратное комптоновское рассеяние не может рассматриваться для объяснения наблюдаемого спектра, т.к. нет известного яркого источника фотонов в данной области.)

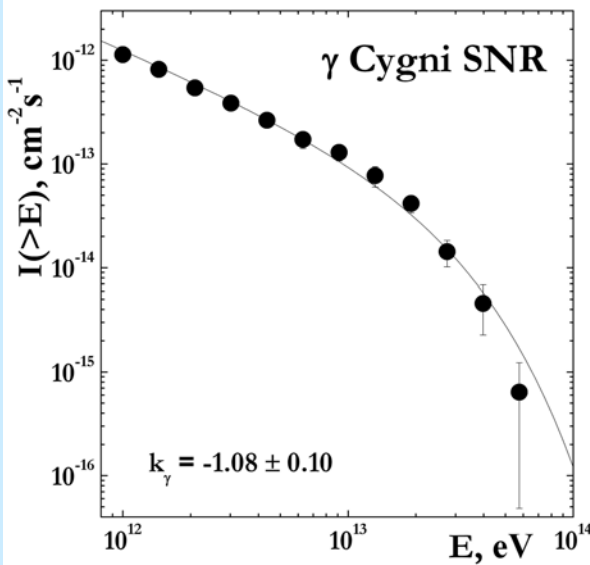
На рисунке представлено спектральное энергетическое распределение излучения IC443 по данным телескопа ШАЛОН (Δ) вместе с теоретическими предсказаниями для данного источника и в сравнении с данными других экспериментов: EGRET, Fermi LAT, MAGIC, VERITAS. Сплошной линией показан спектр для адронного происхождения гамма-излучения сверхвысоких энергий.

IC 443 зарегистрирован телескопом ШАЛОН при энергиях больше 0,8 ТэВ на уровне 7.2σ определяемом по методу Li&Ma, со средним значением интегрального потока :

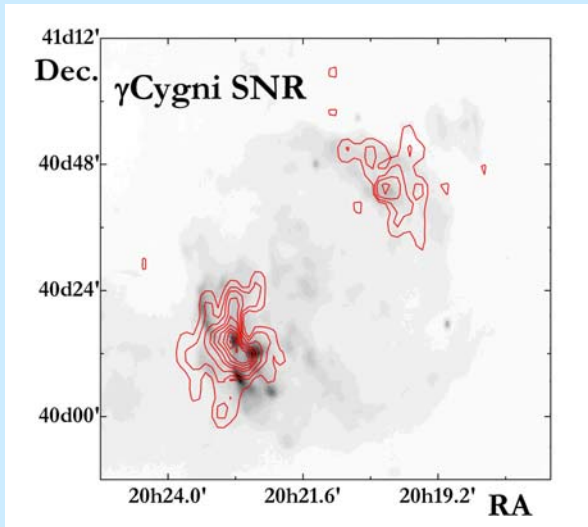
$$I_{\text{IC 443}} (>0,8\text{ТэВ}) = (1,69 \pm 0,58) \cdot 10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

γ Cygni SNR

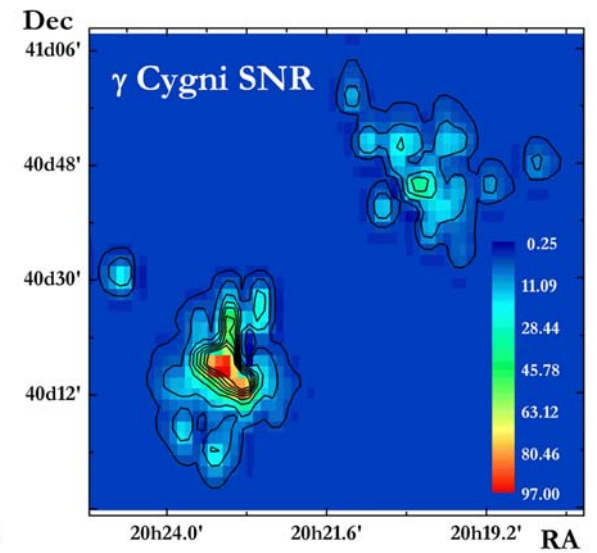
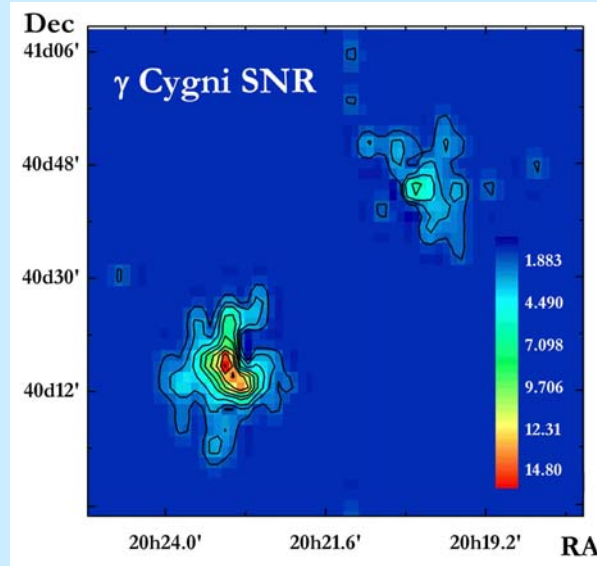
Наблюдения проводились по стандартной для телескопа ШАЛОН методике получения информации о фоне космических лучей и ливнях, инициированных γ -квантами, в одном и том же сеансе наблюдений. При обработке данных наблюдений, γ Cygni SNR был зарегистрирован телескопом ШАЛОН при энергиях больше 0.8 ТэВ на уровне 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: $I(>E_\gamma) \propto E_\gamma^{-1.08 \pm 0.10}$

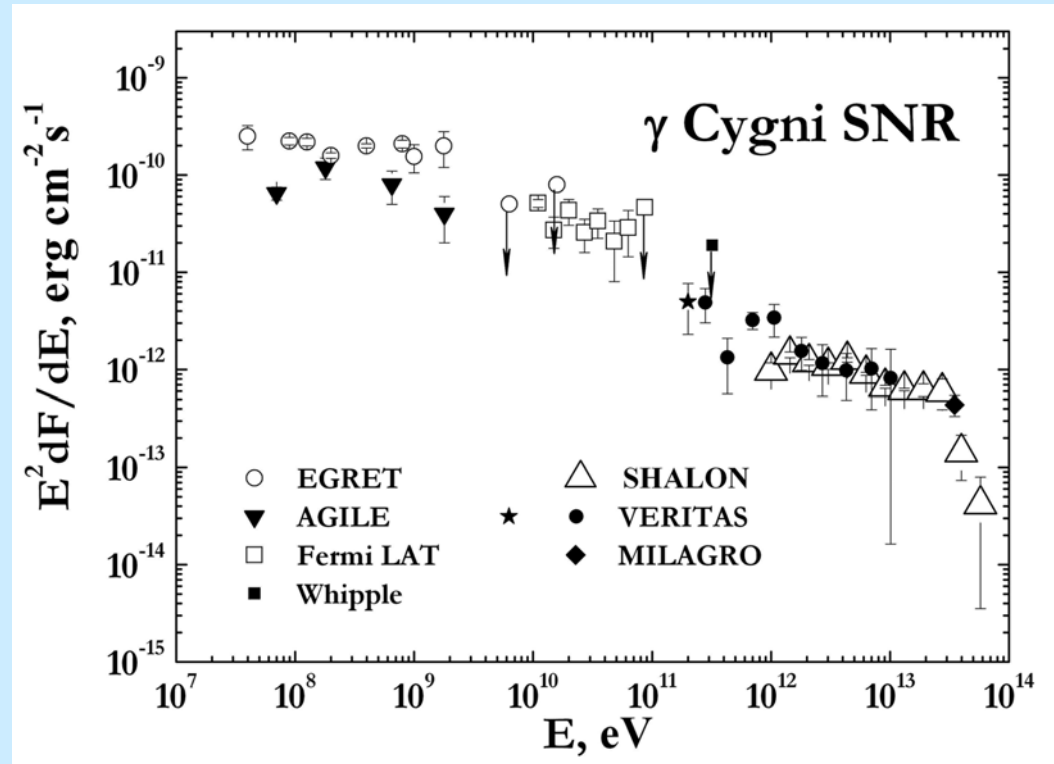


Radio image of γ Cygni SNR (CGPS); The contour lines show the TeV-image by SHALON



The images of γ Cygni SNR by SHALON

γ Cygni SNR



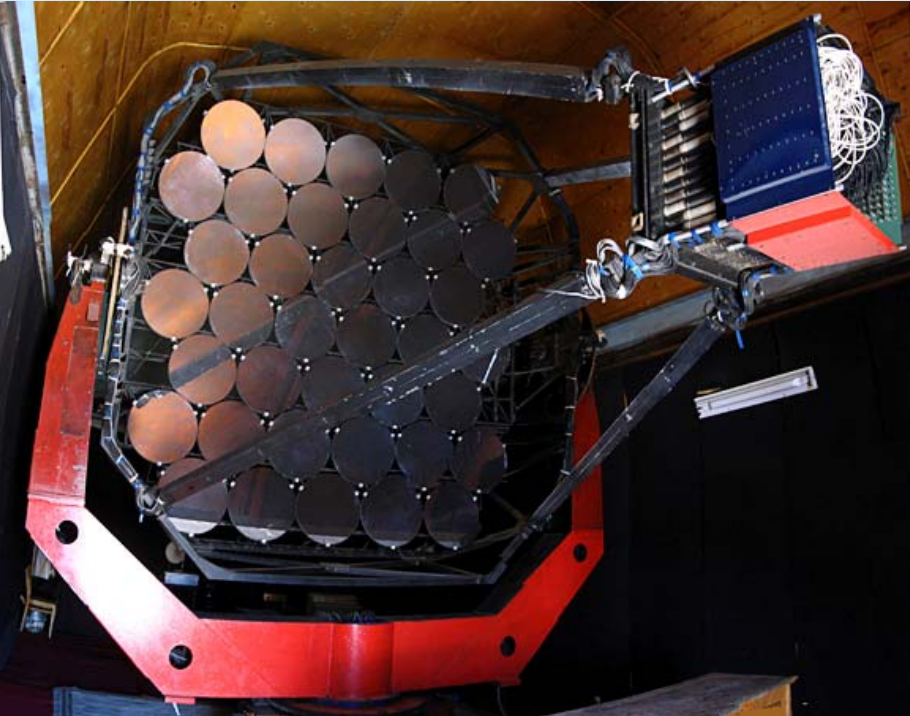
В области высоких энергий, данные по γ Cygni SNR, были получены, в разные годы, на спутниковых экспериментах EGRET в 1995, Fermi LAT (2009-2011) AGILE 2010; на наземном телескопе VERITAS (см. ★) при энергии 200 ТэВ был зарегистрирован протяжённый источник VERJ2019+407 коррелирующий с положением северной 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 :

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

ТэВ-ное гамма-излучение от остатков сверхновых оболочечного типа Tycho's SNR, Cas A, IC 443, γ Cygni SNR



Представлены результаты наблюдений двух типов галактических остатков сверхновых: остатков сверхновых оболочечного типа Тихо, Кассиопея А, IC443 и γ Cygni SNR и плериона Крабовидная туманность, 3с58(SN1181), Геминги (предположительно плериона), полученных с помощью зеркального черенковского телескопа ШАЛОН. Экспериментальные данные подтвердили предсказание теории об адронном механизме генерации гамма-квантов сверхвысоких энергий (0.8–100 ТэВ) в остатке сверхновой Тихо. Полученные данные свидетельствуют о различной природе происхождения гамма-излучения сверхвысоких энергий в обсуждаемых объектах.

