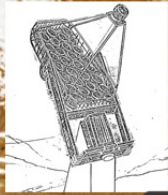


**Гамма-излучение сверхвысоких энергий**  
**Кластера Галактик Персея**  
**и его возможная природа**

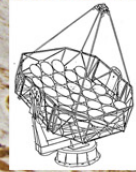
В.Г. Синицина, В.Ю. Синицина

*Физический институт им. П.Н. Лебедева*

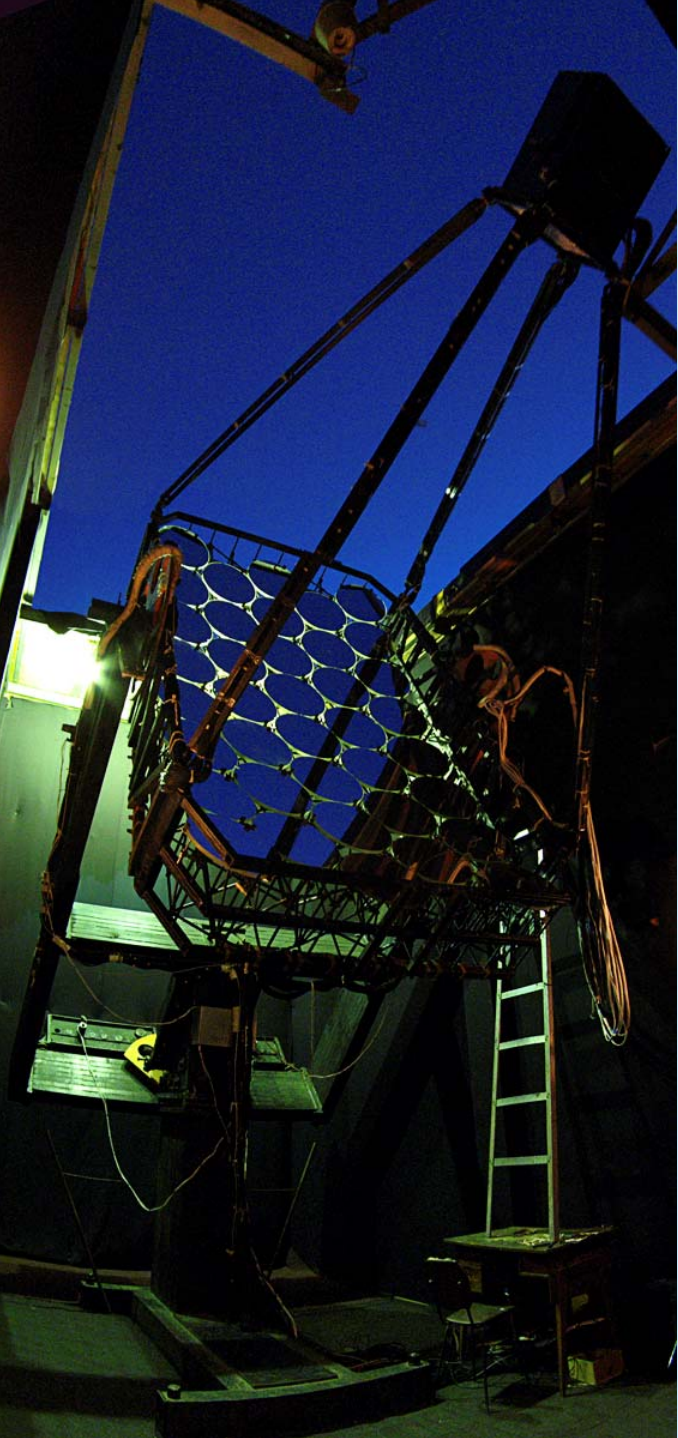




SHALON 2



SHALON 1



## 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 м<sup>2</sup>
- Радиус кривизны зеркала 8.5 м
- Углы поворота зеркала:
  - азимутальный 0°-360°
  - зенитный 0°-110°
- Точность наведения главной оси  $\leq 0.1^\circ$
- Число фотоумножителей 144 (12x12)
- Угол обзора  $> 8^\circ$
- Вес 6 тонн
- Экваториальная монтировка

# Active Galactic Nuclei

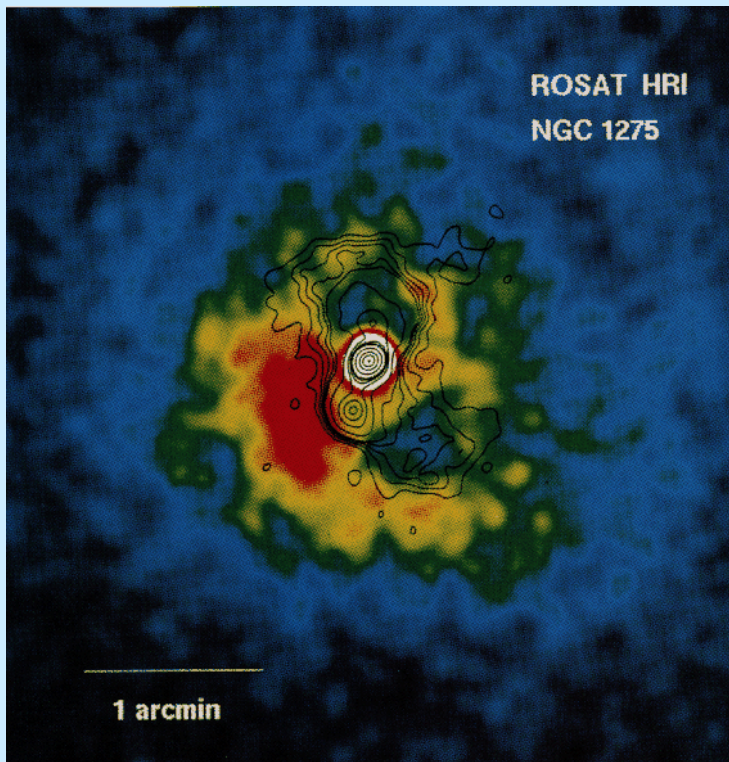


The dominant galaxy in the  
Perseus cluster is NGC 1275.

В эксперименте ШАЛОН проводятся долговременные исследования центральной галактики скопления - NGC 1275. Представлены результаты пятнадцатилетних наблюдений активной галактики NGC 1275 при энергиях 800 ГэВ – 40 ТэВ, обнаруженной телескопом ШАЛОН в 1996 году

Скопление галактик в созвездии Персея является одним из наиболее изученных скоплений, благодаря относительной близости (расстояние составляет  $\sim 100$  Мпк или красное смещение  $z = 0.0179$ ) и яркости. Скопления галактик уже давно рассматриваются как возможные кандидаты в источники ТэВ-ных гамма-лучей, излучаемых протонами и электронами, ускоренными на крупномасштабных ударных волнах или галактическим ветром, или активными ядрами галактик. Доминантной галактикой в скоплении Персея является NGC1275.

# NGC 1275



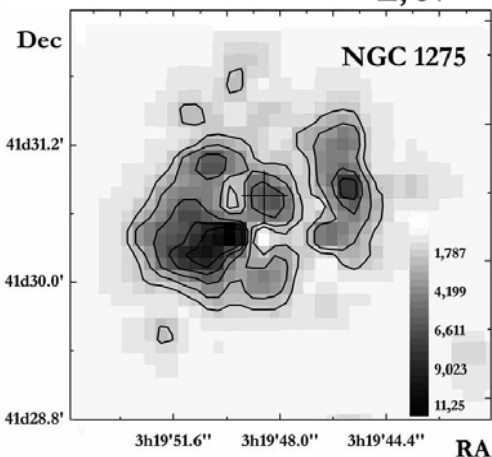
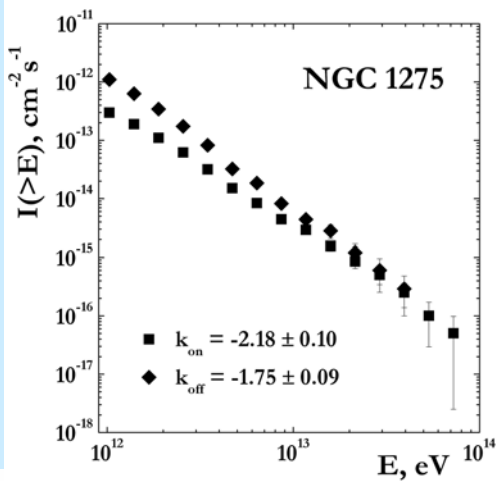
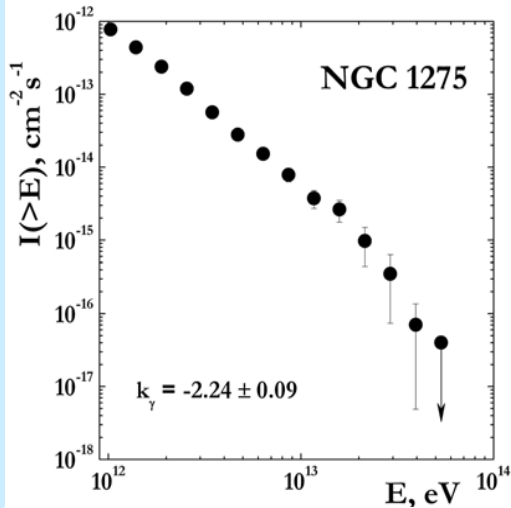
NGC 1275 является мощным источником радио- и рентгеновского излучения. В радиодиапазоне объект, найденный в NGC 1275, известный также как Персей А и 3С84, имеет мощное и компактное ядро, которое хорошо изучено радио- телескопом VLBI. NGC 1275 является чрезвычайно яркой в радиодиапазоне; она имеет ярко выраженную структуру, состоящую из компактного центрального источника и протяженного выброса. Радиоизлучение простирается на большие расстояния и демонстрирует явное взаимодействие с газом внутри кластера галактик Персея. Наблюдения ROSAT, а позднее и Chandra, выявили наличие полостей в находящемся внутри скопления газе, присутствие которых предполагает, что выбросы 3С84 выметают многочисленные “пузыри” в атмосфере скопления Персея.

Галактика NGC 1275, окруженная протяженными волокнистыми структурами, исторически вызывала большой интерес благодаря как своему положению в центре Скопления Персея, так и своей возможной “подпитывающей” скопление роли. Свидетельство “подпитывающей” роли NGC 1275 может быть получено из результатов наблюдений ROSAT и Chandra, из которых видны оболочки из горячего газа и полости, которые пространственно совпадают с радио-структурами, тянущимися от центральной, активной части АГЯ.

Изображение источника NGC 1275 в рентгеновском диапазоне (0.1–2.4 кэВ), полученное телескопом ROSAT. Контурами представлена радиоструктура источника по данным радио-наблюдений VLA. Максимумы радио- и рентгеновского излучения совпадают с активным галактическим ядром NGC 1275, тогда как рентгеновское излучение практически полностью исчезает в окрестности ярких участков радиокомпонент.

# NGC 1275

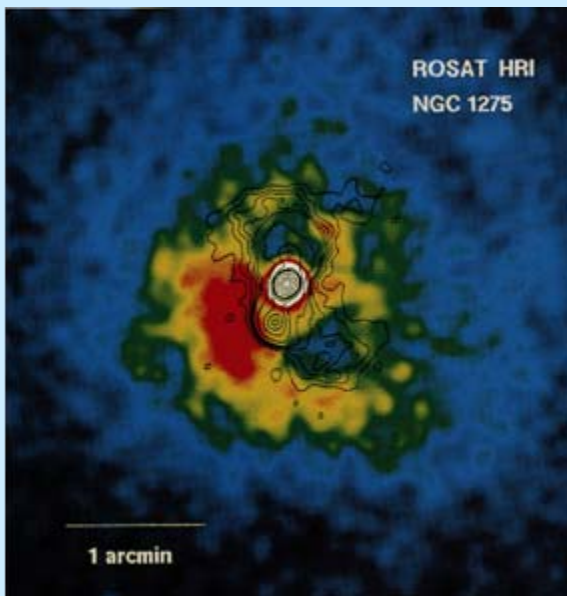
В 1996 г. в наблюдениях зеркальным черенковым телескопом ШАЛОН был обнаружен новый метagalactic источник гамма-излучения сверхвысоких энергий  $E > 800$  ГэВ. Положение источника излучения, зарегистрированного в нашем эксперименте, согласуется по своим координатам с сейфертовской галактикой NGC 1275.



NGC 1275 наблюдалась телескопом ШАЛОН 271.2 ч в разные годы (с 1996 по 2012) в ясные безлунные ночи под зенитными углами от  $3^\circ$  до  $33^\circ$  градусов. Наблюдения проводились по стандартной для телескопа ШАЛОН методике получения информации о фоне космических лучей и ливнях, инициированных гамма-квантами, в одном и том же сеансе наблюдений. Гамма-излучение от NGC 1275 было зарегистрировано телескопом ШАЛОН при энергиях больше 800 ГэВ на уровне  $31.4\sigma$  определяемом по Li&Ma

Среднее значение интегрального потока при энергиях больше 800 ГэВ для NGC 1275 составляет  $(0.78 \pm 0.05) \times 10^{-12}$   $\text{cm}^{-2}\text{сек}^{-1}$ . Энергетический спектр гамма-квантов в наблюдаемом диапазоне энергий от 0.8 ТэВ хорошо описывается степенным законом  $F(>E_0) \propto E^{k_\gamma}$ , with  $k_\gamma = -2.24 \pm 0.09$ . Представлены вместе спектры *ON*-событий ( $k_{ON} = -2.18 \pm 0.10$ ) и *OFF*-событий ( $k_{OFF} = -1.75 \pm 0.09$ ), необходимых для получения спектра гамма-квантов, излучаемых NGC 1275.

# NGC 1275



Для выяснения механизмов генерации излучения сверхвысоких энергий в источнике и проверки моделей их описывающих необходимо установить возможные взаимосвязи между областями излучения ТэВ-ных гамма-лучей и фотонов низких энергий: радио- и рентгеновского диапазонов.

Также были скомбинированы изображения, полученные телескопом ШАЛОН-1 (0.8–40 ТэВ) и телескопом Chandra (рентген 1.5–3.5 кэВ).

В рентгеновской области энергий вид ядра скопления Персея, в целом, представляет собой явную циркулярно-симметричную структуру с выраженным максимумом на NGC 1275.

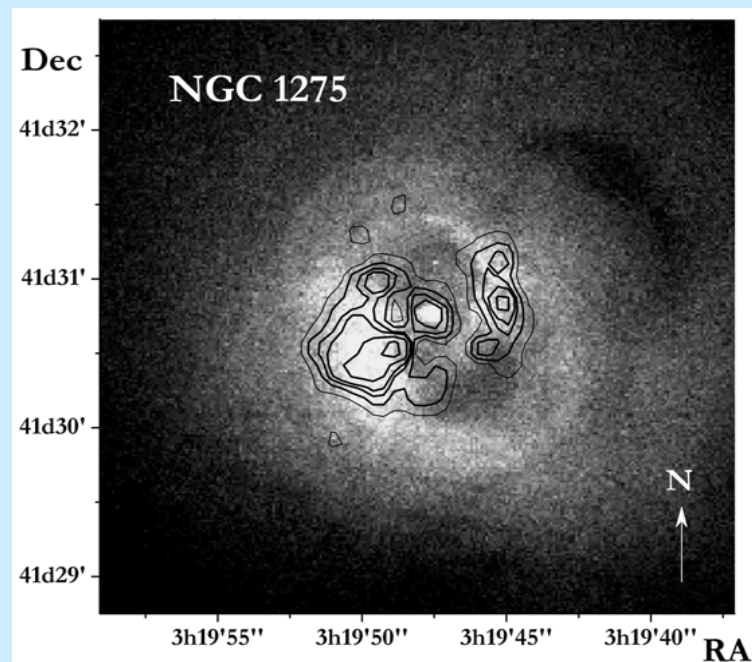
Ясно видимое ослабление интенсивности рентгеновского излучения, коррелирует с компонентами протяженной двойной радиоструктурой 3C84. Эти “провалы” окружены яркими, при энергиях 1.5–3.5 кэВ, областями-дугами с севера и юга. Простейшая интерпретация состоит в том, что яркое излучение этих краев – это оболочки, окружающие радиополости. Также наблюдается яркое пятно излучения к востоку.

Наблюдаемые телескопом ШАЛОН области излучения гамма-квантов сверхвысоких энергий NGC 1275 хорошо коррелируют с областями излучения фотонов в диапазоне 1.5–3.5 кэВ

Таким образом, ТэВ-ое гамма-излучение, зарегистрированное телескопом ШАЛОН от NGC 1275, имеет протяженную структуру с выраженным ядром, центрированным на положении источника.

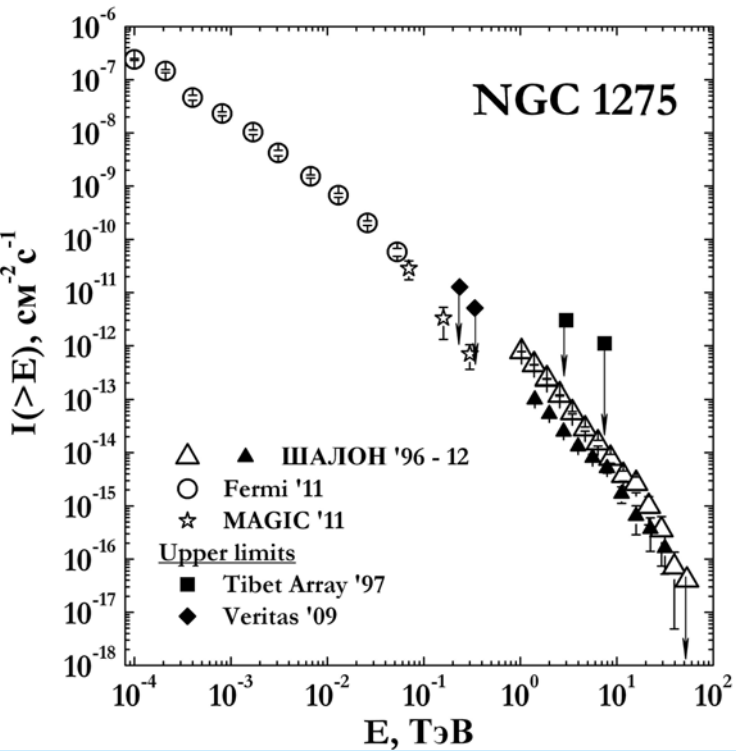
Формирование протяжённой структуры вокруг NGC 1275, пространственно совпадающей с областями рентгеновского излучения, может происходить благодаря механизмам связанным с генерацией рентгеновской структуры

**Изображение источника NGC 1275** в рентгеновском диапазоне (1.5–3.5 кэВ), полученное телескопом Chandra; **Контур** — данные телескопа ШАЛОН в области энергий 800 ГэВ–40 ТэВ.





# NGC 1275



Для анализа излучения связанного с ядром дополнительно была выделена компонента излучения соответствующая центральной области NGC 1275 размером 32". Излучение центральной области NGC 1275 зарегистрировано при энергиях больше 0.8 ТэВ на уровне  $13.5\sigma$ , определяемом по методу Li&Ma. со средним значением интегрального потока:

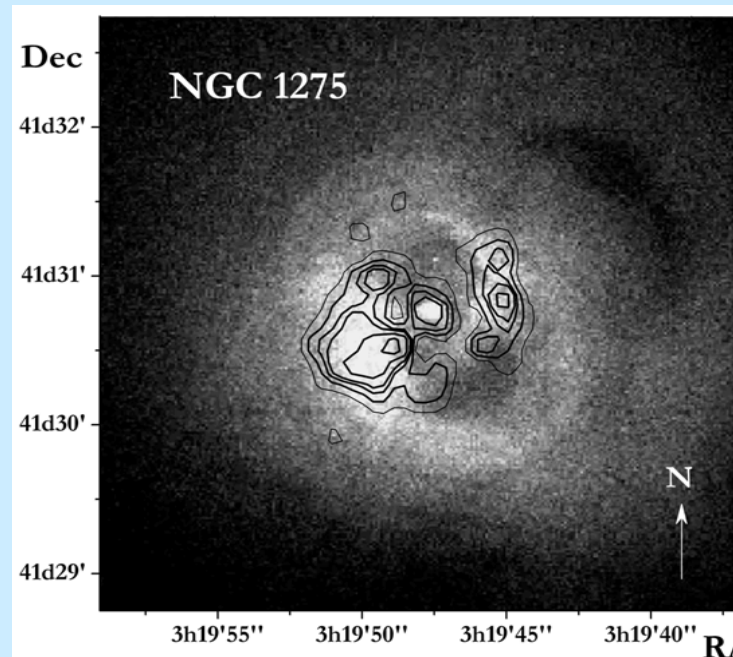
$$I(> 800 \text{ ТэВ}) = (3.26 \pm 0.30) \times 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}.$$

Энергетический спектр гамма-квантов центральной компоненты во всем диапазоне энергий от 0.8 до 40 ТэВ хорошо описывается степенным законом с экспоненциальным обрезанием:

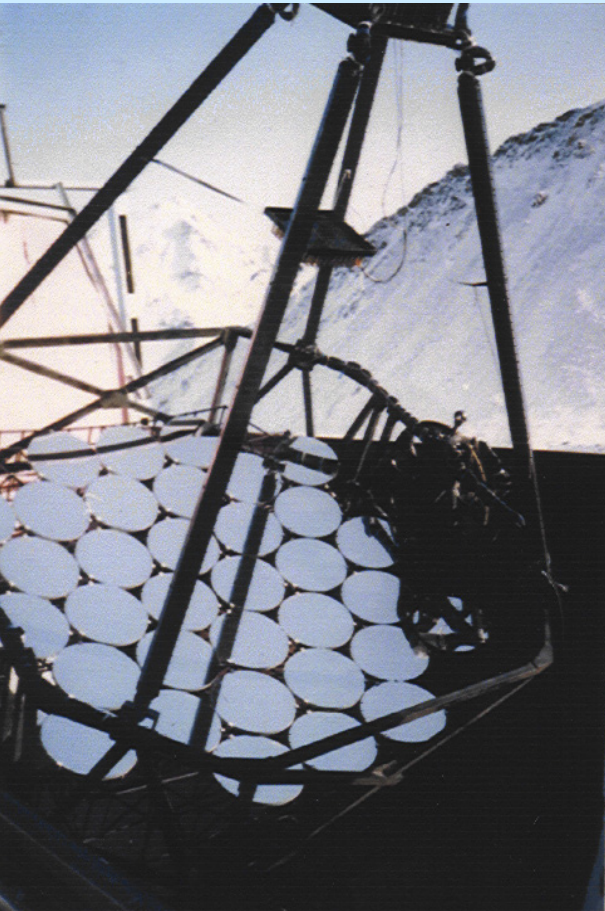
$$I(> E_\gamma) = (2.92 \pm 0.11) \times 10^{-13} \times E_\gamma^{-1.55 \pm 0.10} \times \exp(-E_\gamma/10 \text{ ТэВ}) \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$$

Спектр, соответствующий излучению центральной области галактики NGC 1275 по данным телескопа ШАЛОН, представлен на рисунке чёрными треугольниками.

Распределение яркости рентгеновского излучения и наблюдаемого ТэВ-ного излучения демонстрирует резкое увеличение интенсивности сразу за пределами пузырей, надуваемых центральной чёрной дырой и видимых в радио диапазоне. Это свидетельствует о том, что генерирующие рентгеновское излучение частицы, выметаются из области радиолобов под давлением космических лучей и магнитных полей, генерирующихся в выбросах центра галактики NGC 1275 (Фабиан и др., 2006; Чуразов и др., 2000). Образование структур, видимых в ТэВ-ных гамма-лучах, происходит благодаря взаимодействию космических лучей сверхвысоких энергий с газом внутри скопления Персея и подогреву межзвёздного газа на границе пузырей, надуваемых центральной чёрной дырой, находящейся в галактике NGC 1275.



# Переменность гамма-излучения NGC1275

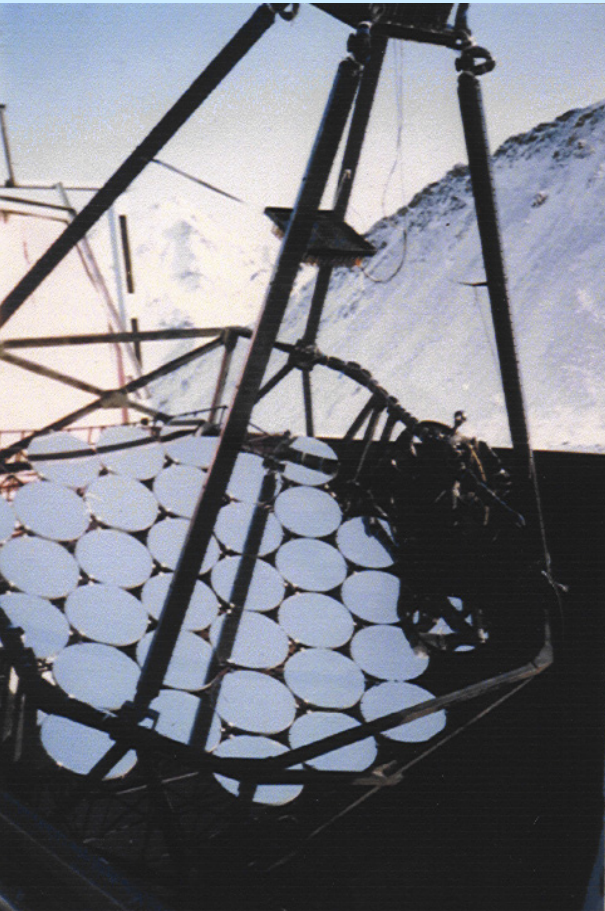


Надежное выявление вспышек и их длительности при долговременных наблюдениях зеркальными черенковскими телескопами осложнено тем, что методика делает невозможным непрерывное слежение за источником, так как требует таких условий, как безлунные ночи, что уже создает разрыв в данных на период более 10 дней; также необходима идеальная атмосфера без облаков, дымки, и, кроме того, прохождение источника на расстоянии не более  $35^\circ$  от зенита, так как влияние изменения толщины атмосферы должно быть минимальным. Тем не менее выявление корреляций излучения в разных диапазонах энергии, сопоставление областей излучения, и особенно изменения потоков излучения, остается необходимым, поскольку дает возможность судить о природе источника, его эволюции и механизмах генерации излучения в различных объектах. Наблюдаемые вариации потока гамма-излучения, в среднем, не превышают 20% от  $(7.8 \pm 0.5) \times 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Всего за все время наблюдения NGC 1275 зеркальным черенковским телескопом ШАЛОН было выявлено три кратковременных, в пределах пяти дней, повышения потока гамма-излучения сверхвысоких энергий и одно понижение.



# Переменность гамма-излучения NGC1275



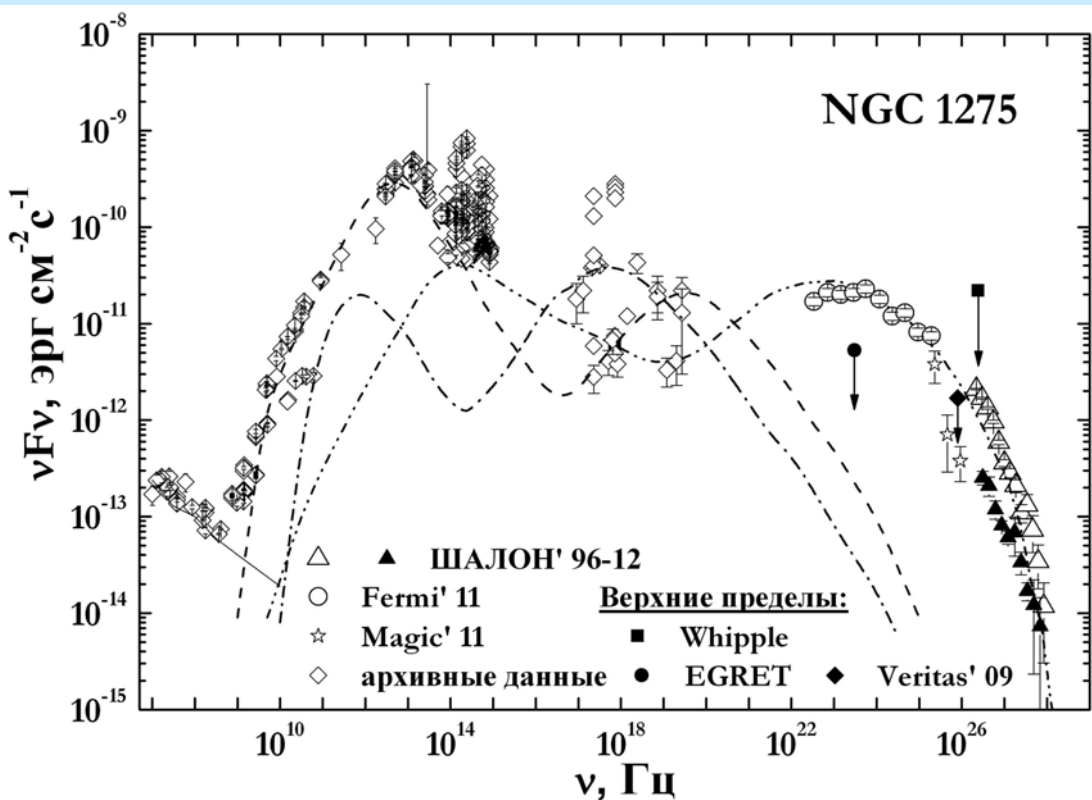
Понижение потока до значения ниже среднего с учетом указанных вариаций отмечалось в 1999 г., и интегральный поток составил  $(4.7 \pm 1.3) \times 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Повышения отмечались в конце января 2001 г., в конце ноября–в начале декабря 2005 г. и в конце октября 2009 г.

Потоки в указанные периоды соответственно составили  $(21.2 \pm 7.5) \times 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ,  $(35.5 \pm 12.4) \times 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и  $(23.4 \pm 4.5) \times 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Длительность повышения потока в октябре 2009 г. составила 3 дня. В 2001 и 2005 годах выявить интервалы увеличения потока не удалось, т.к. в обоих случаях серия наблюдений была прервана из-за погодных условий.

Для выявления возможных корреляций излучения в разных диапазонах энергии, в том числе при высоких и сверхвысоких энергиях, были сопоставлены потоки гамма-излучения от NGC 1275, полученные телескопом ШАЛОН, в периоды наблюдений одновременно с экспериментом Fermi LAT. Данные Fermi LAT, приведенные в литературе, были получены в период с 4 августа 2008 г. по 30 сентября 2010 г.. На телескопе ШАЛОН наблюдения NGC 1275 проводились в ноябре 2008 г. с перерывом на время Луны; в октябре 2009 г., в середине ноября, начале декабря 2010 г. За это время было отмечено единственное повышение потока гамма-квантов в период 18–20 октября 2009 г. до значения  $(23.4 \pm 4.5) \times 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Указанные периоды наблюдений телескопом ШАЛОН не совпадают со временем основных вспышек, наблюдаемых на Fermi LAT. Небольшое локальное увеличение потока видно в период середины октября 2009 г., соответствующее упомянутому увеличению потока гамма-квантов, наблюдаемому телескопом ШАЛОН.



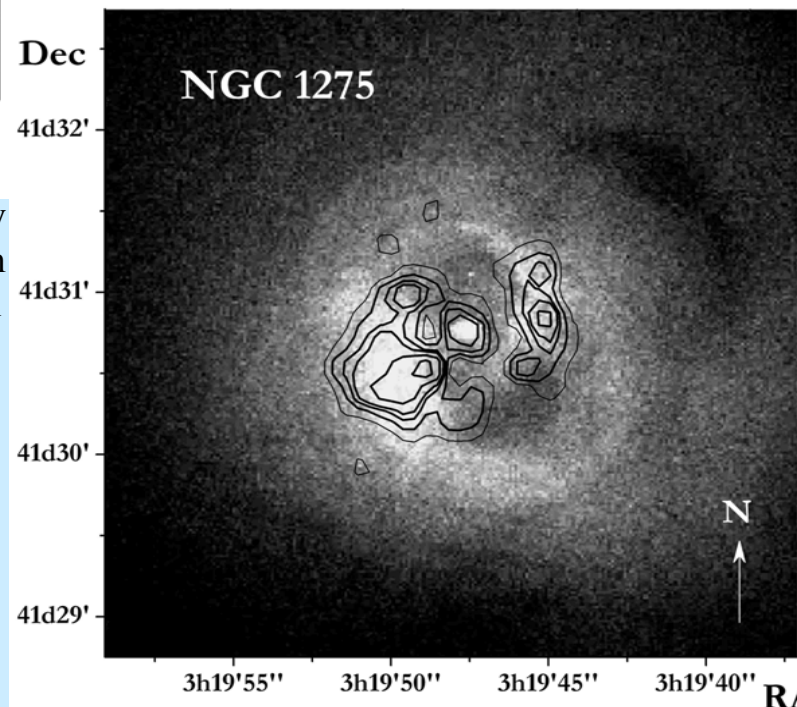
# NGC 1275



Overall spectral energy distribution of NGC 1275. The TeV energy spectrum of NGC 1275 from SHALON, 15 year observations in comparison with other experiments: Fermi LAT'09-11, MAGIC'10-11 and upper limits: EGRET'95, Whipple'06, Veritas'09 and models.

Наличие излучения в диапазоне энергий 1 - 40 ТэВ из центральной области размером  $\sim 32''$  вокруг ядра галактики NGC 1275 (чёрные треугольники), а также кратковременная переменность излучения, указывает на происхождение излучения сверхвысоких энергий в результате генерации джетов, выбрасываемых центральной сверхмассивной чёрной дырой галактики NGC 1275.

Полученные данные при сверхвысоких энергиях, а именно изображения галактики и её окрестностей, а также переменность излучения, указывают на то, что ТэВ-ое гамма-излучение образуется в результате целого ряда процессов: а именно, часть этого излучения генерируется в результате релятивистских выбросов в самом ядре галактики NGC 1275. Тогда как наличие протяжённой структуры вокруг NGC 1275 свидетельствует о взаимодействии космических лучей и магнитных полей, генерирующихся в выбросах центра галактики, с газом скопления Персея.



# Заключение

Скопление галактик в созвездии Персея, как и другие скопления, уже давно рассматриваются как возможные кандидаты в источники гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий генерированного различными механизмами. В эксперименте ШАЛОН проводятся долговременные исследования центральной галактики скопления – NGC 1275. Представленырез ультаты пятнадцати-летних наблюдений активной галактики NGC 1275 при энергиях 800 ГэВ–40 ТэВ, обнаруженной телескопом ШАЛОН в 1996 г. Полученные данные при сверхвысоких энергиях, а именно изображения галактики и ее окрестностей, а также переменность излучения, указывают на то, что ТэВ-ое гамма-излучение образуется в результате целого ряда процессов: а именно, часть этого излучения генерируется в результате релятивистских выбросов в самом ядре галактики NGC 1275. Тогда как наличие протяженной структурывокруг NGC 1275 свидетельствует о взаимодействии космических лучей и магнитных полей, генерирующихся в выбросах центра галактики, с газом скопления Персея.

