

**СВЕШНИКОВА Л.Г.
НИИЯФ МГУ
ЛАБОРАТОРИЯ НАЗЕМНОЙ
ГАММА-АСТРОНОМИИ.**

**Спектр гамма-квантов от
Крабовидной туманности
в эксперименте TAIGA**



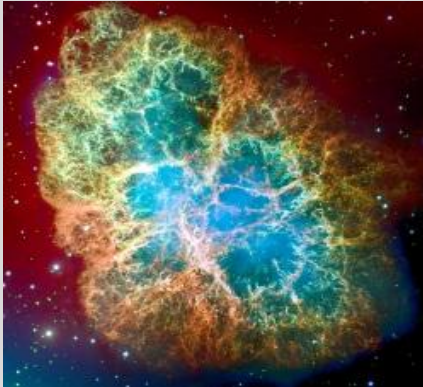
TAIGA(TUNKA ADVANCED INSTRUMENT FOR GAMMA ASTRONOMY)

Самая северная обсерватория в мире. Основная задача Поиск ПэВатронов, т.е. источников, в которых рождаются протоны с энергией более 1-3 ПэВ, которые могут образовывать гамма-кванты с энергией более 100-300 ТэВ.



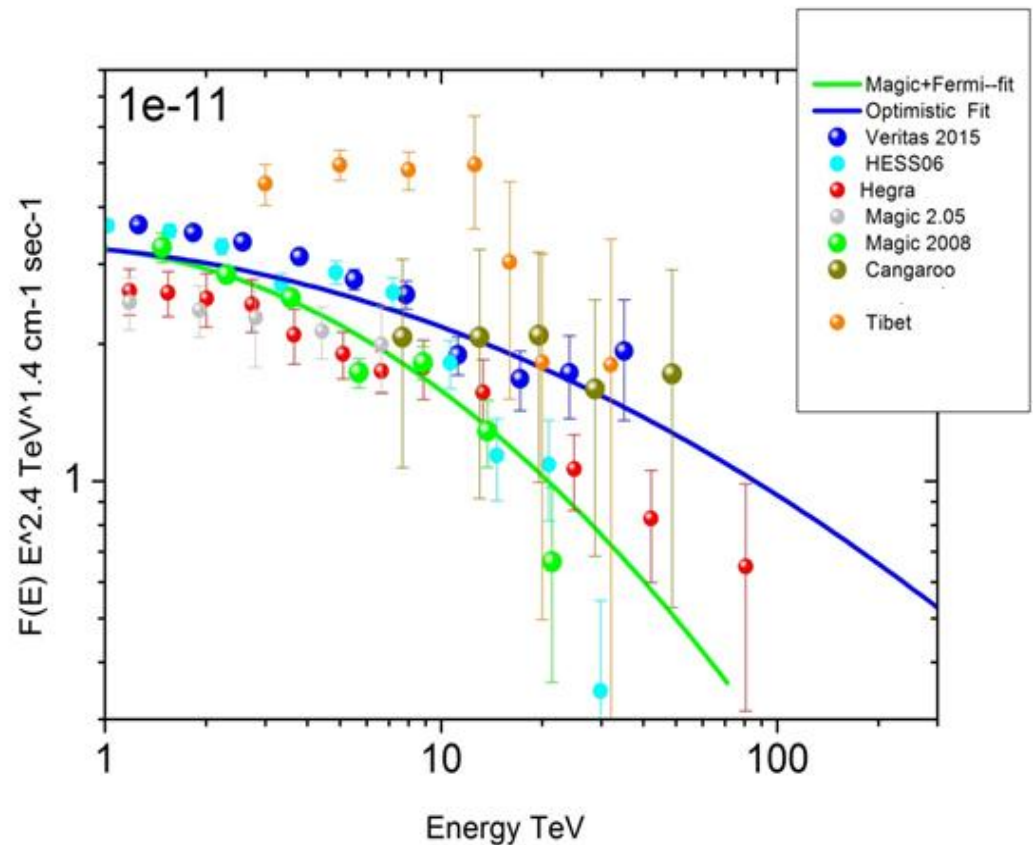
Тихо Браге
1572 SNR1a

СПЕКТР КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ, ПОЛУЧЕННЫЙ ДО 2017 Г.



Крабовидная туманность
Пульсарная туманность
1054

‘Standard candle’ но и
источник который продолжает
приносить сюрпризы.



ПОСЛЕДНИЕ ДАННЫЕ ПО КРАБУ

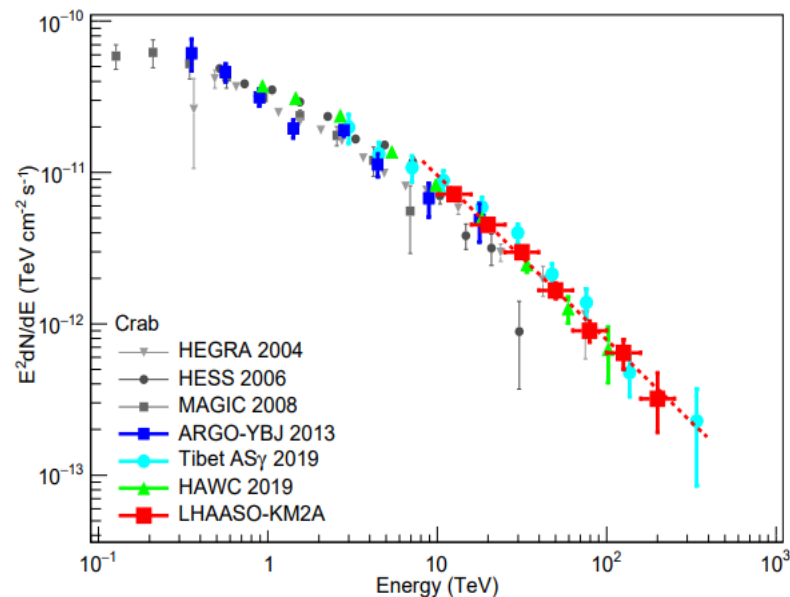


Fig. 17. The spectrum of the Crab Nebula measured by KM2A in red together with the spectra

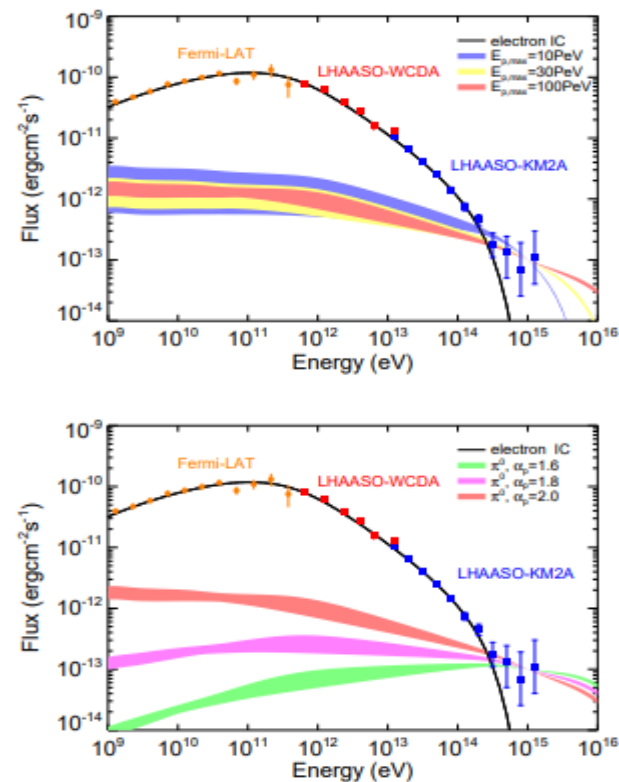


Figure 2. Upper panel: Possible hadronic gamma-ray components for a fixed proton injection spectral index of $\alpha_p = 2$ for the Crab nebula. The blue, yellow, red bands represent the cases of $E_{p,max} = 10$ PeV, 30 PeV, and 100 PeV with $\eta_p = (10 - 57)\%$, $(13 - 39)\%$, and $(21 - 36)\%$, respectively. The solid black curve represents the electron IC flux, obtained by LHAASO Collaboration (2021) for the multi

Прорыв с измерением гамма-квантов выше 100 ТэВ произошел на установках LAASO, HAWC, TIBET. Все установки не являются черенковскими телескопами.

КРАБ – ПэВатрон ???

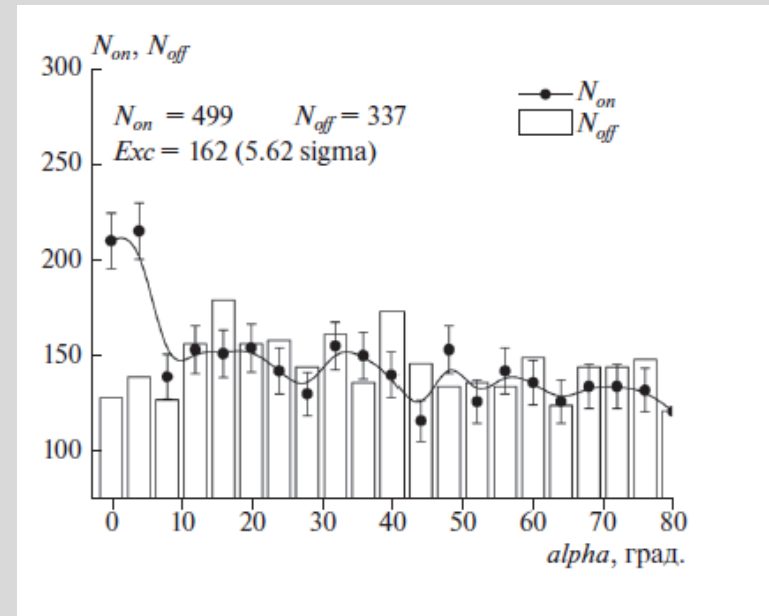
ОСНОВНАЯ ЗАДАЧА

Восстановить спектр частиц, что является гораздо более сложной задачей:

Так как требуется :

- а) уточнение калибровок
- б) расчет эффективных площадей
- с) разработка методов определения энергии

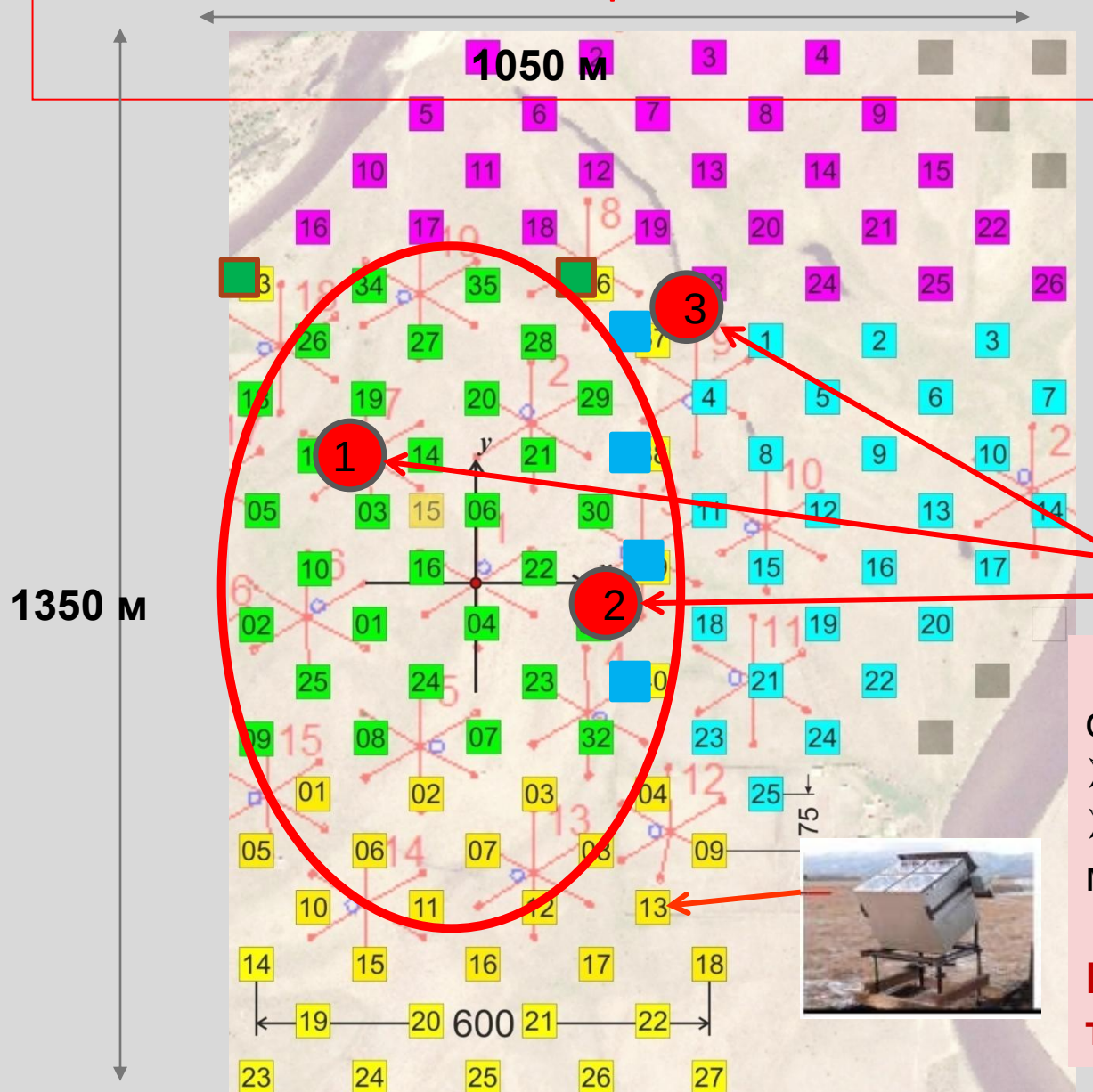
Только по данным одного телескопа, что имеет смысл по ряду причин



Избыток частиц от Краба ,
представленный на 36 РКЛ

TAIGA -1 : 120 станций HiSCORE и 3 телескопа : 2022

TAIGA -0 : 56 станций HiSCORE и 1 телескоп: эта работа



$$S = 1.1 \text{ км}^2$$



Основной метод - это
стерео метод с порогом
 $\geq 10 \text{ ТэВ}$,
 $\geq$ и гибридный
метод с порогом $> 40 \text{ ТэВ}$

**Порог для одного
телескопа 3-6 ТэВ**



ОБРАБОТКА ДАННЫХ И ПОЛУЧЕНИЕ ИМИДЖЕЙ

- 1 шаг: Восстановление матрицы $Amplitude(X, Y)$ и вычитание пьедесталов(фона)
- 2 шаг: Привязка к положению источника в камере по файлам слежения телескопа
- 3 шаг: Анализ качества данных, удаление данных из плохо-работающих пикселей и пикселей со звездой, выбрасывание временных интервалов с плохой погодой или технических проблем



4. шаг: клининг: выделение имиджа над фоном

5. шаг: Параметризация имиджей

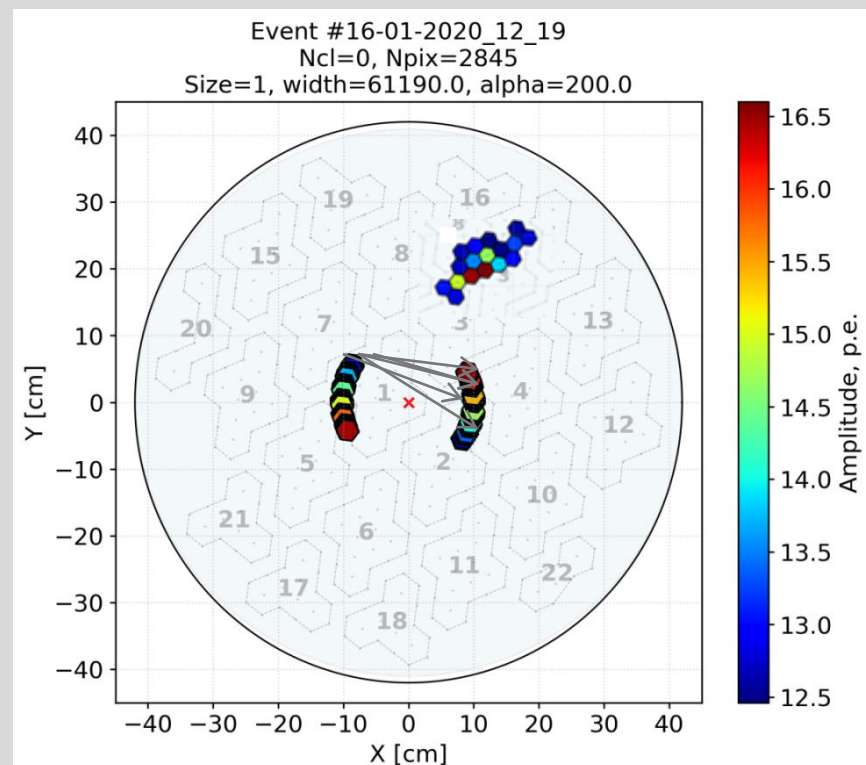
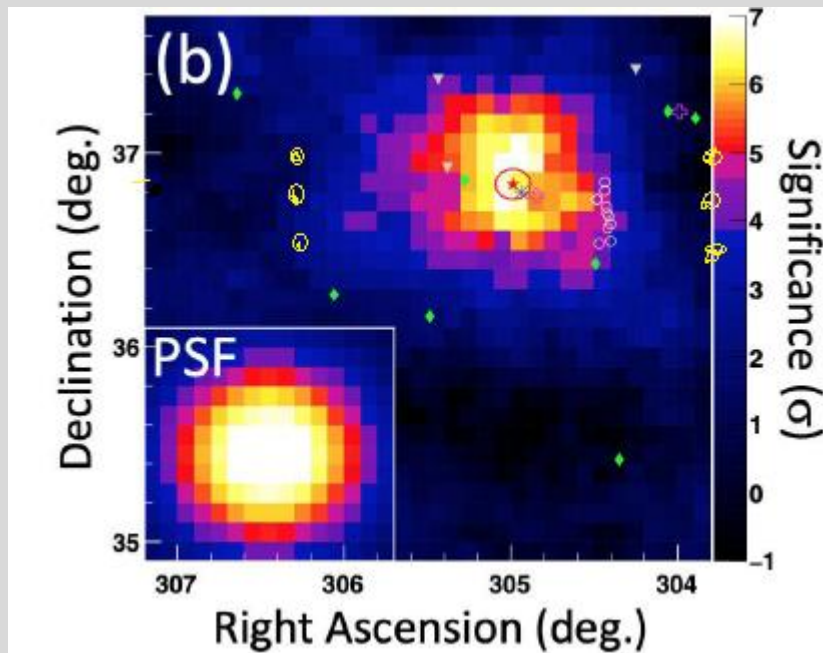
6. шаг: М-К расчеты и нахождение оптимальных катов для подавления адронного фона

7. шаг: выявление гамма подобных ливней, определение энергии.Избыток и явление

8. Шаг: построение спектра и нахождение интенсивности

ПРОЦЕДУРА СЛЕЖЕНИЯ И ВЫБОР ФОНА

$$\text{Dec}=\text{Dec}_{\text{Crab}}, \quad \text{Ra}=\text{Ra}_{\text{Crab}}+-1.2$$



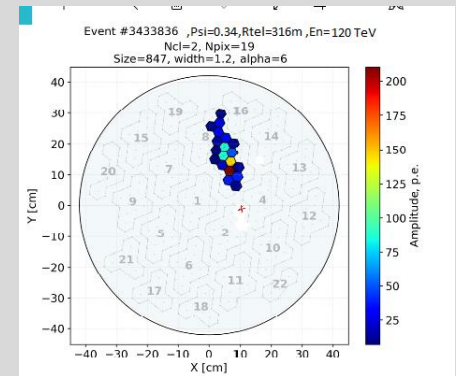
$$\text{Excess}=\text{Non-Noff}$$

$$\text{Sigma}=\sqrt{(\text{Non}+\text{Noff})}$$

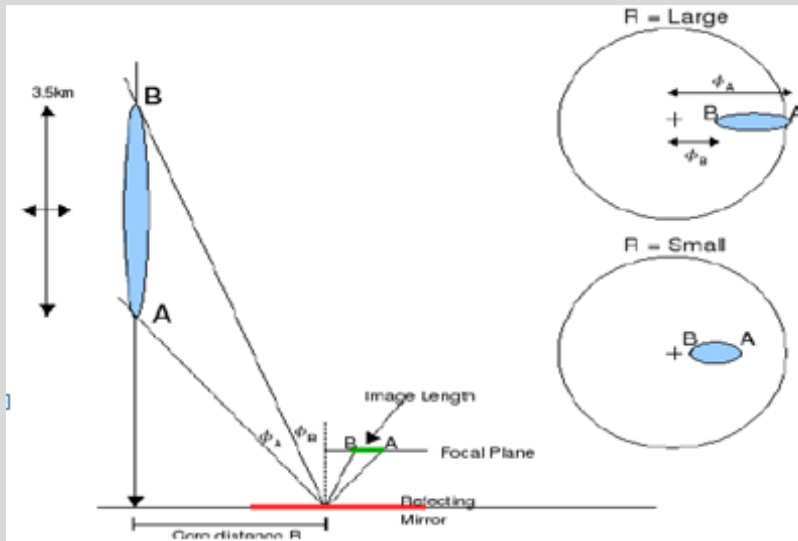
$$\text{Sigma}=\sqrt{(\text{Non}+\text{Noff}/5)}$$

$$\text{Significance}=\text{Excess}/\text{sigma}$$

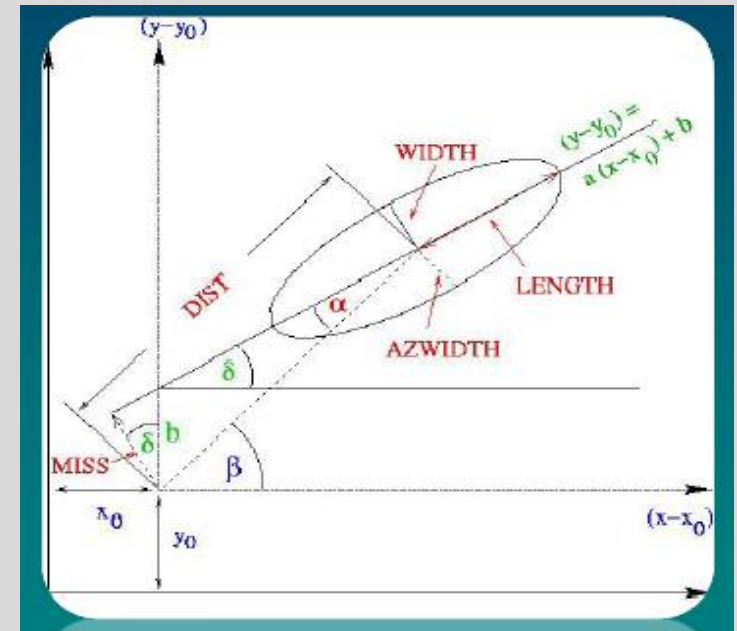
ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ИМИДЖЕЙ



Формирование имиджа в атмосфере



Параметры Хилласа и др



Главная задача – подавление фона адронов в $10^3 - 10^4$ раз

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОБЫТИЙ

После параметризации имиджей необходимо восстановить физические параметры зарегистрированных событий

1) Определение сорта первичной частицы

- а) подавление адронов по параметру ширины и длины и ряду других параметров в ручном режиме*
- б) использование алгоритм классификации Random Forest*

2) Первичное направление ливня tet2 *-DISP метод (1 телескоп)*

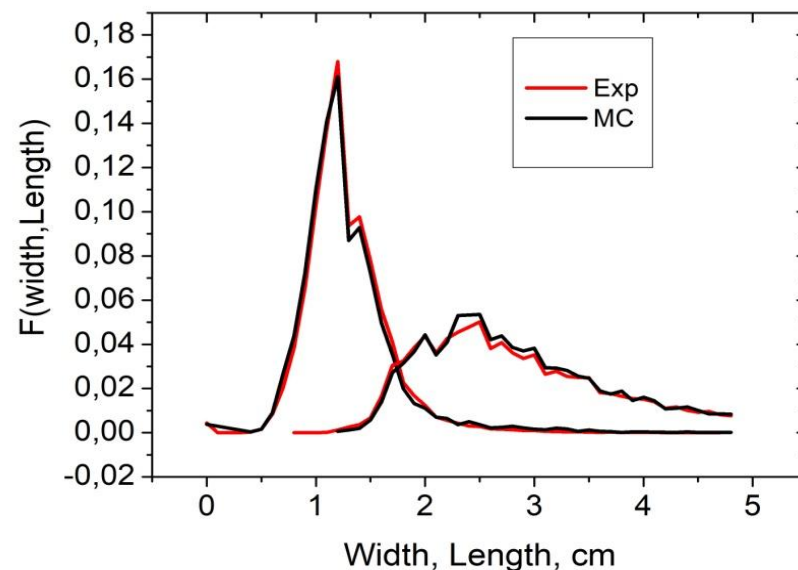
3) Первичная энергия ливня

- а) $E = F(\text{Size}, \text{dist})$ (1 telescope)*

б) много-параметрическое восстановление по программам машинного обучения (мы использовали регрессию в Random Forest)

МОНТЕ-КАРЛО СИМУЛЯЦИИ И Q ФАКТОР

- 1) Настройка М-К для описания экспериментальных данных по **адронам**
- 2) Настройка оптимальных критериев для подавления фона адронов
- 3) Оценка коэффициентов подавления фона

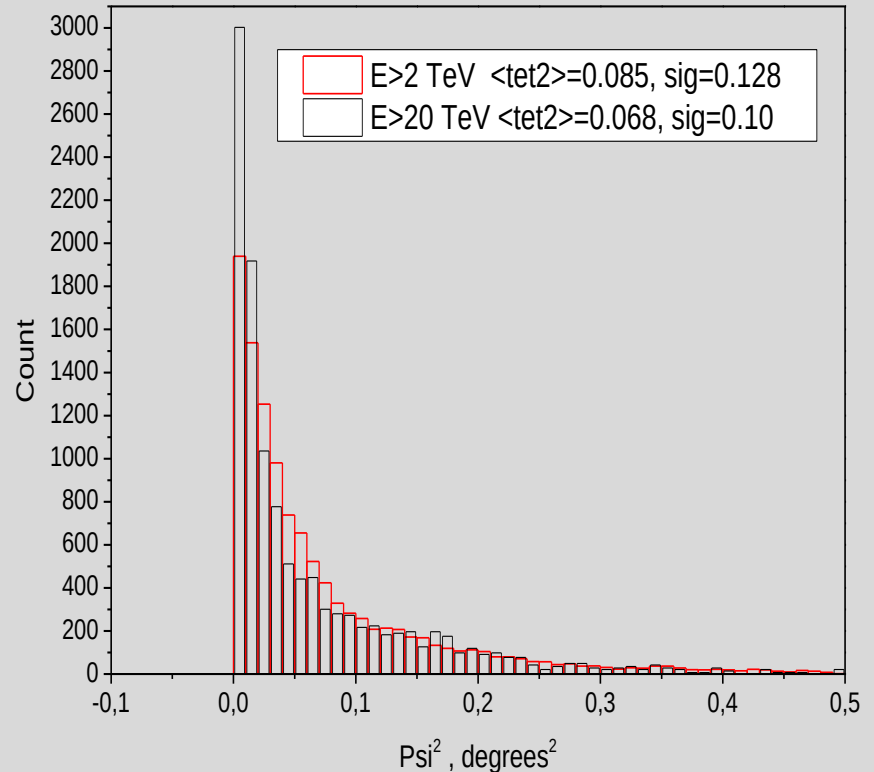
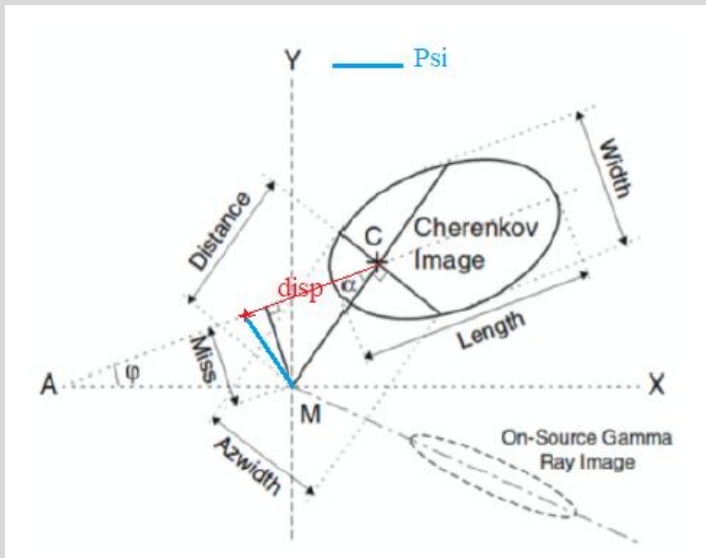


$$Qfactor = \epsilon_{\gamma} / (\sqrt{\epsilon_h}) \sim 4-8$$

Оценки Q фактора по при применение RANDOM FOREST

Rc	train	test	g->g	h->h	h->g	g->h	ϵ_g	ϵ_h	Q factor
23	36876	9218	1761	4105	40	683	0.38208	0.00965	3.88942
18	35702	8924	1526	3998	36	653	0.34200	0.00892	3.62028
13	32264	8064	1330	3636	23	520	0.32986	0.00629	4.16053
8	17666	4416	1016	2040	20	217	0.46014	0.00971	4.66996
5	3560	890	175	423	1	55	0.39326	0.00236	8.09769

ОПРЕДЕЛЕНИЕ TET^2 ПО ДАННЫМ ОДНОГО ТЕЛЕСКОПА



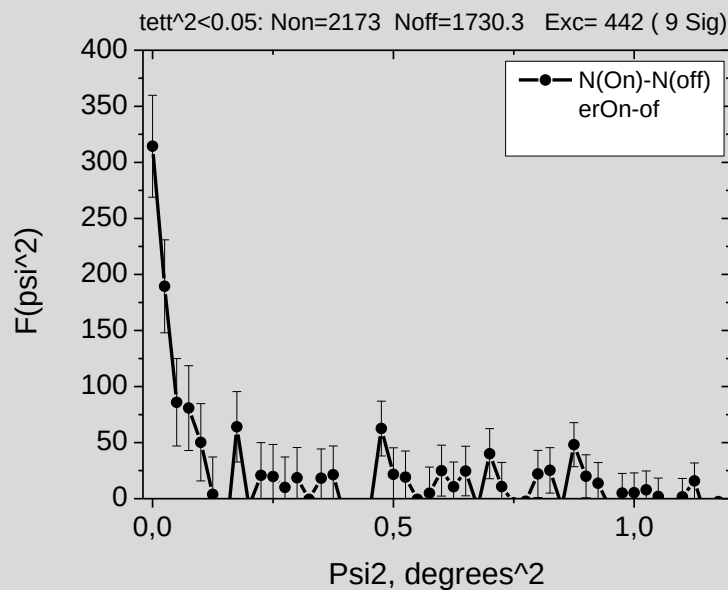
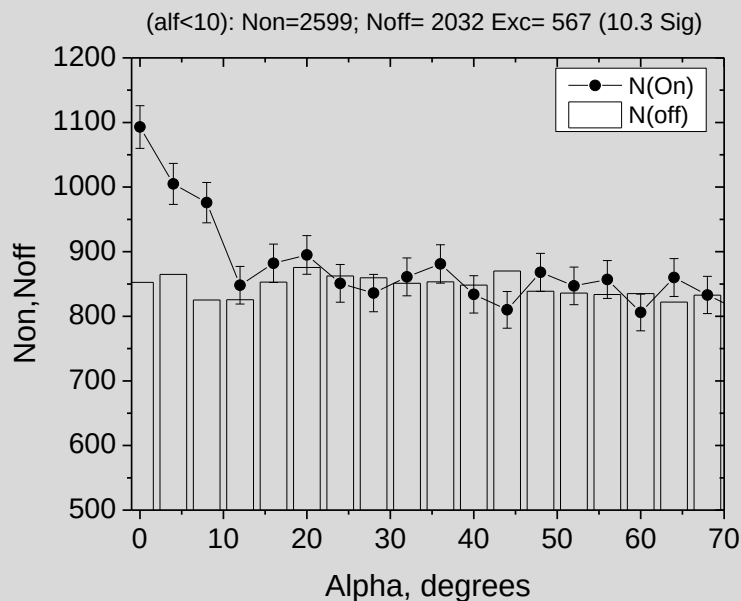
$\text{disp} = (1. - \text{width}/\text{length}) * \text{coef};$
 $\text{Coef} = F(\text{Size}, \text{dist})$
 $\text{tet}^2 = \text{disp}^2 + \text{dist}^2 - 2 * \text{disp} * \text{dist} * \cos(\alpha)$

E > 2 TeV $\langle \text{tet}^2 \rangle = 0.085$, sig = 0.128
 E > 20 TeV $\langle \text{tet}^2 \rangle = 0.068$, sig = 0.10

РЕЗУЛЬТАТЫ: 2019 –2021: ~60 ДНЕЙ ~150 ЧАСОВ

Основные каты
подавления фона

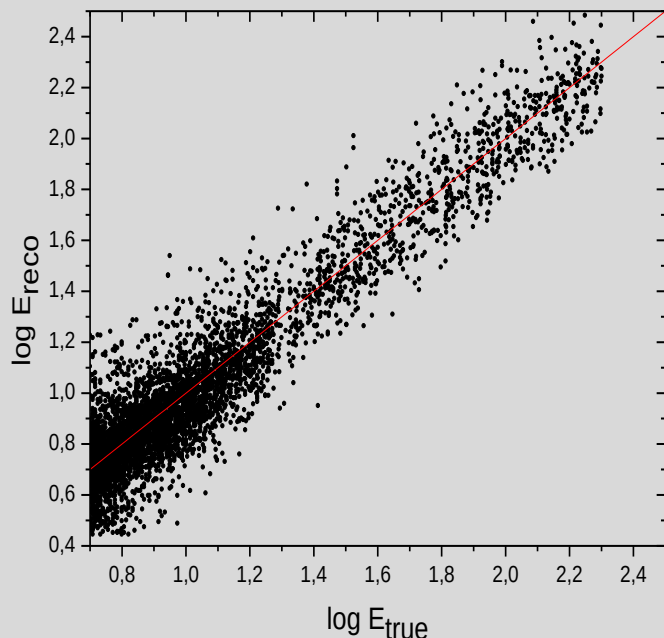
Size > 120 p.h.; $N_{px} > 3$;
 $0.36^\circ < dist < -1.44^\circ$,
 $0.024 < width < (0.068^\circ \times \lg Size - 0.047^\circ)$,
 $length < 0.145^\circ \times \lg Size$



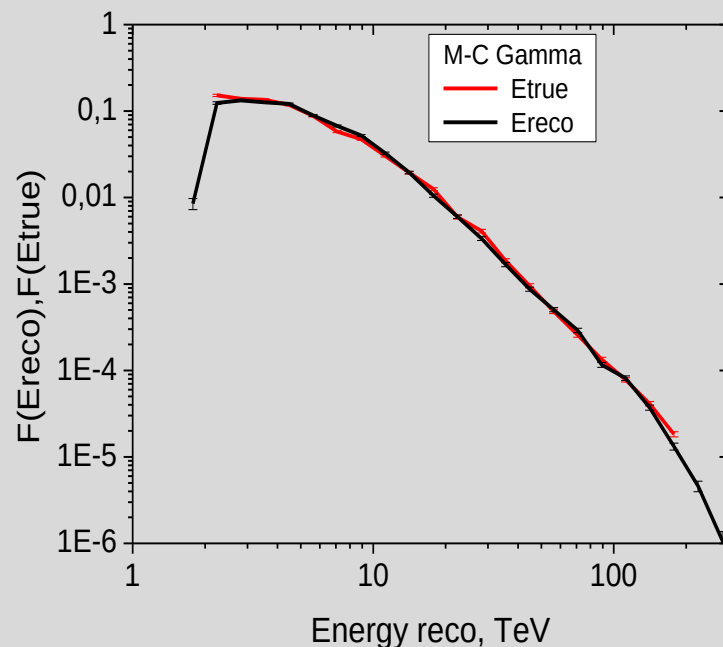
Excess 450-550 частиц со значимостью 9-11 sigma

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ

$$\text{Log E}_{\text{reco}} = a + b \cdot \text{log Size}$$



Точность определения энергии одним телескопом **32-33%** в области энергий 5-200 TeV и слабо зависит от энергии



Спектр по истинной энергии и измеренной энергии по данным М-К, кроме того разрабатывается процедура анфолдинга

ПЕРЕХОД К СПЕКТРУ ПО ЭНЕРГИИ

$$F(E_{\text{reco}}) = (N_{\text{on}}(E_{\text{reco}}) - N_{\text{off}}(E_{\text{reco}})) / S_{\text{eff}}(E_{\text{reco}}) / \text{Time} ,$$

$$S_{\text{eff}} = (N > \text{cut} / N_0 * S_0)$$

$$\text{Time} = 150 \text{ hr}$$

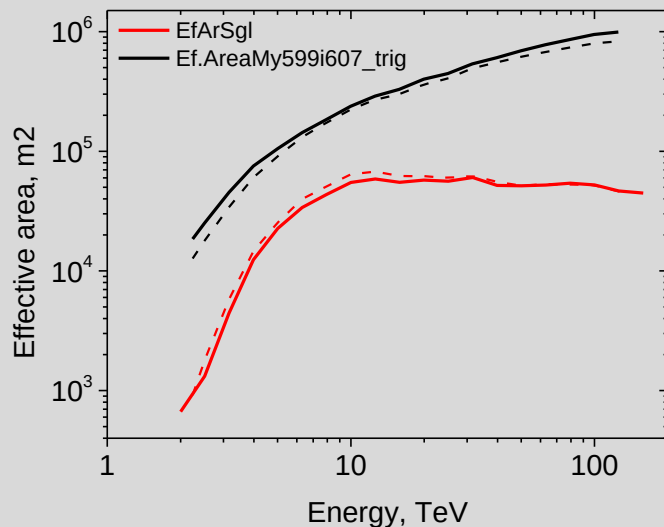
Основные критерии подавления фона

$\text{Size} > 120 \text{ p.h.}; N_{\text{px}} > 3;$

$0.36^\circ < \text{dist} < -1.44^\circ,$

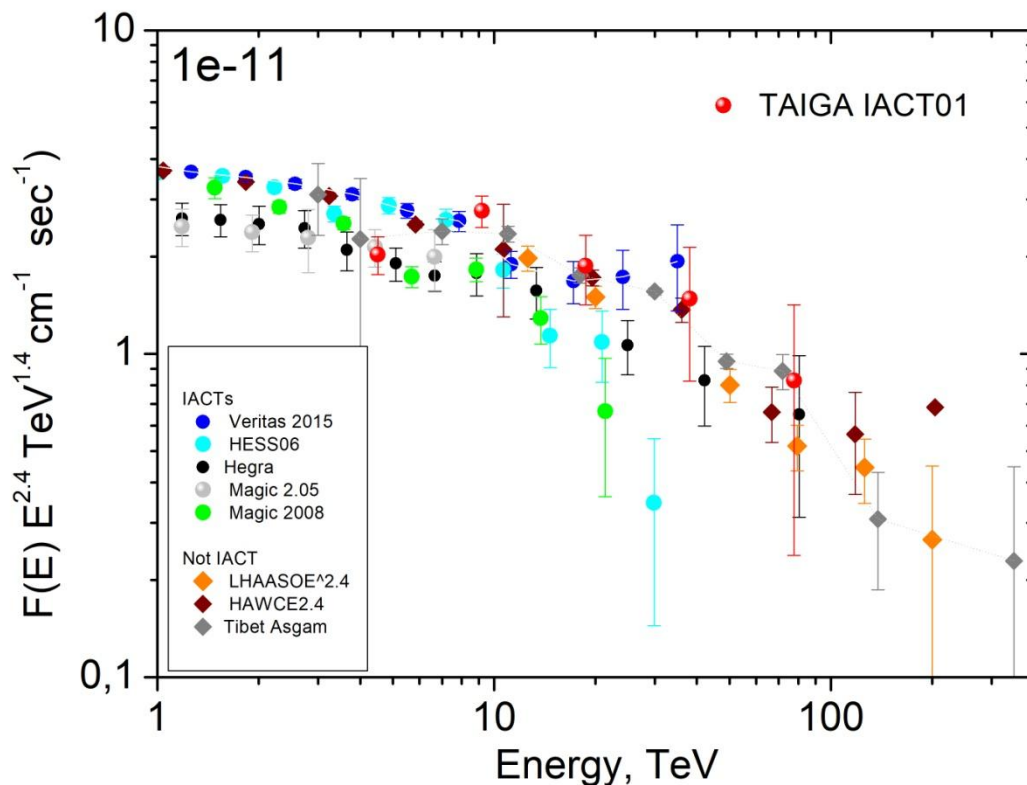
$0.024 < \text{width} < (0.068^\circ \times \lg \text{Size} - 0.047^\circ),$

$\text{length} < 0.145^\circ \times \lg \text{Size}$



Эффективная площадь (М-К)

СПЕКТР ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ КРАБА ПО ДАННЫМ IACT01



Спектр гамма-излучения от Краба по данным 1-ого телескопа
За 150 часов наблюдения.

ВЫВОДЫ

Отработана методика восстановления энергетического спектра по данным одного телескопа

За 150 часов наблюдения получен избыток событий в области 5-100 ТэВ (450-550) частиц с значимостью 9-11сигма

Пороговая область регистрации одним телескопом ~ 5 ТэВ для источников видных под углом $\Theta = 30-42^\circ$;

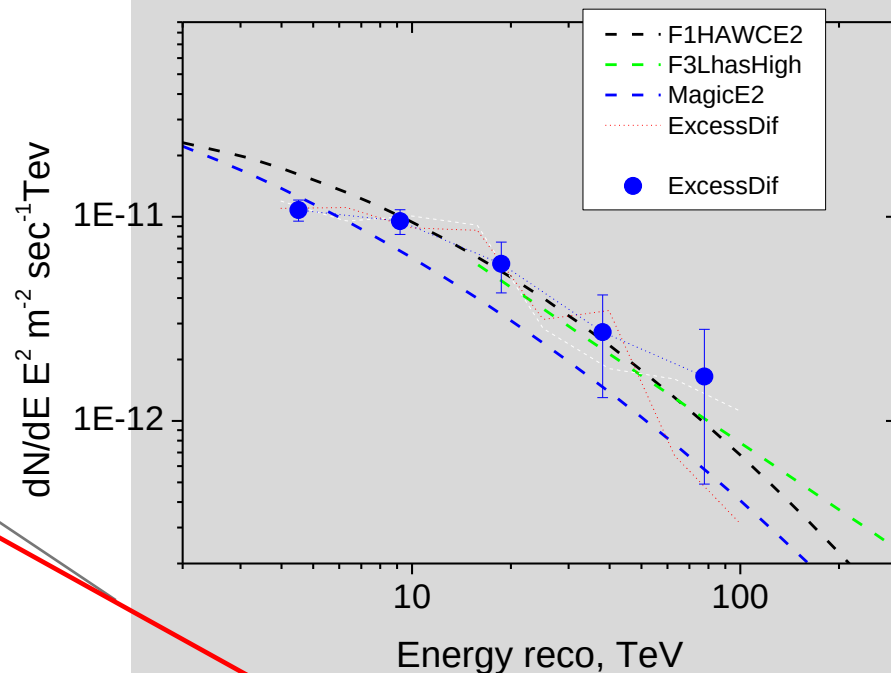
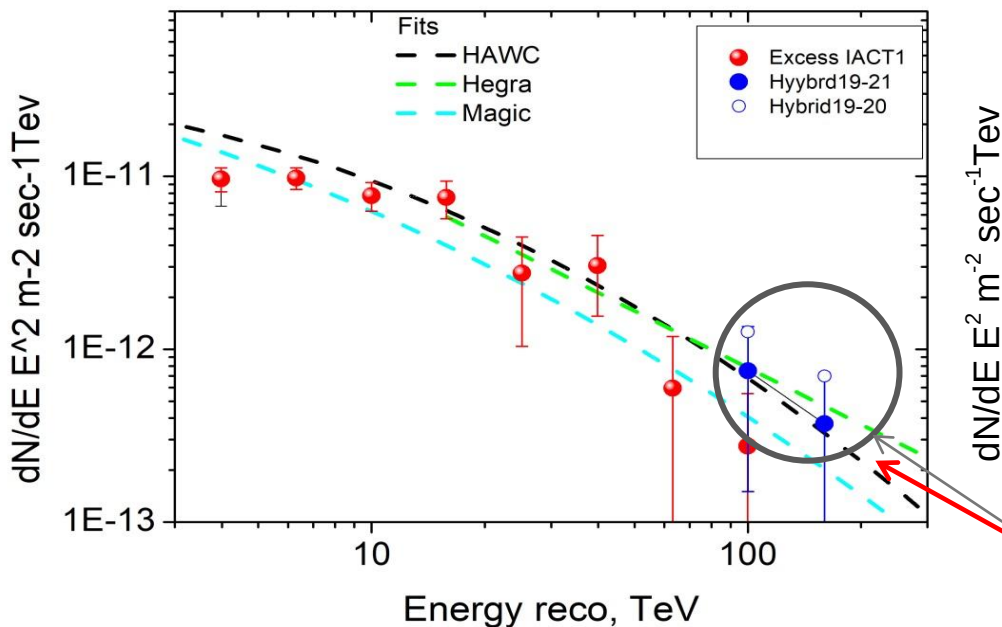
Интенсивность не противоречит мировым данным.

В области 50-100 ТэВ наблюдается 3-5 частиц, флуктуации большие из-за высокого фона в этой области энергий, но в этой области можно включать данные гибридного метода.

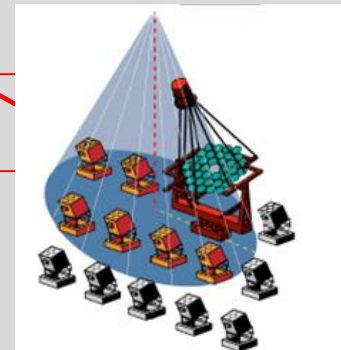
**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ !**

СПЕКТР ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ КРАБА

tet2 < 0.05 Non=2173 Noff= 1554 Exc=618 sig ~12



Данные
Гибридного метода 4



БУДУЩЕЕ

Table 1 | UHE γ -ray sources

Source name	RA (°)	dec. (°)	Significance above 100 TeV ($\times\sigma$)	$E_{\max}$ (PeV)	Flux at 100 TeV (CU)
LHAASO J0534+2202	83.55	22.05	17.8	0.88 ± 0.11	1.00(0.14)
LHAASO J1825-1326	276.45	-13.45	16.4	0.42 ± 0.16	3.57(0.52)
LHAASO J1839-0545	279.95	-5.75	7.7	0.21 ± 0.05	0.70(0.18)
LHAASO J1843-0338	280.75	-3.65	8.5	$0.26 - 0.10^{+0.36}$	0.73(0.17)
LHAASO J1849-0003	282.35	-0.05	10.4	0.35 ± 0.07	0.74(0.15)
LHAASO J1908+0621	287.05	6.35	17.2	0.44 ± 0.05	1.36(0.18)
LHAASO J1929+1745	292.25	17.75	7.4	$0.71 - 0.07^{+0.36}$	0.38(0.09)
LHAASO J1956+2845	299.05	28.75	7.4	0.42 ± 0.03	0.41(0.09)
LHAASO J2018+3651	304.75	36.85	10.4	0.27 ± 0.02	0.50(0.10)
LHAASO J2032+4102	308.05	41.05	10.5	1.42 ± 0.13	0.54(0.10)
LHAASO J2108+5157	317.15	51.95	8.3	0.43 ± 0.05	0.38(0.09)
LHAASO J2226+6057	336.75	60.95	13.6	0.57 ± 0.19	1.05(0.16)

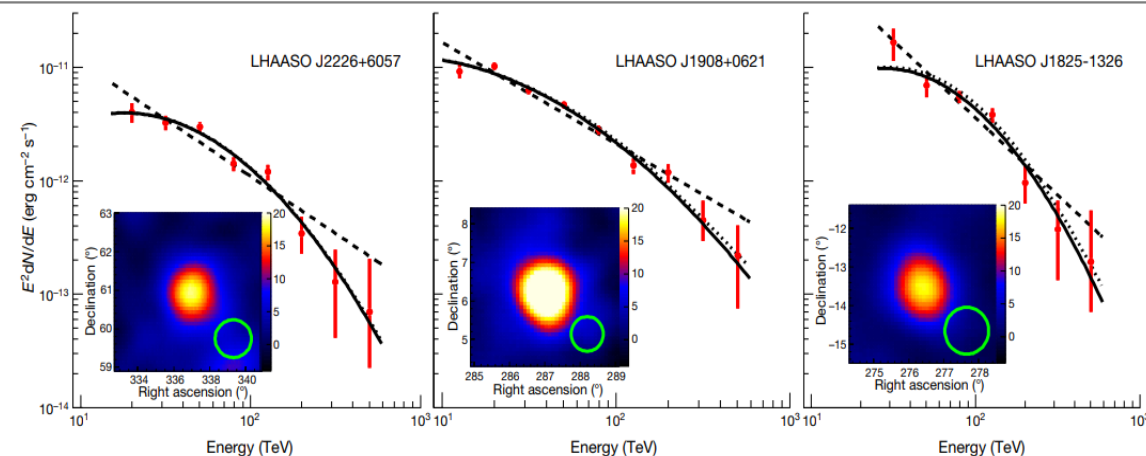
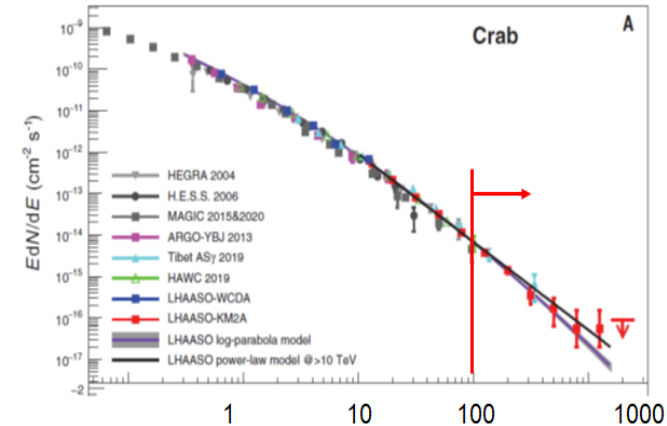


Fig. 1 | Spectral energy distributions and significance maps. a - c, Data are shown for LHAASO J2226+6057 (a), LHAASO J1908+0621 (b), and LHAASO

AIC_{LOG} = 11.6 and AIC_{PL} = 14.8 for LHAASO J1825-1326. The insets show the significance maps of the three sources, obtained for γ -rays above 25 TeV. The

LHAASO&TAIGA-1



LHAASO: >100 TeV, 2500 h (1 year) 89 gamma, 1 hadrons

TAIGA-1 : >100 TeV 100 h (1 year) 20 gamma, 5 hadrons

Нужно увеличивать площадь в 10 раз – TAIGA-10

Для гамма квантов
эффективный порог
регистрации с
помощью HiSCORE ~
50-100 ТэВ

Будущие 5 лет

1. Наблюдение Краба и других PWN (Boomerang, Draginfly)
2. Высокоэнергичной границы спектра от блазаров Mrk 421, Mrk 501, Mrk 180
3. Sygnus –Cocon
4. Спектр и массовый состав в диапазоне 100 -1000 ТэВ
5. Поиск локальной анизотропии и новых источников по данным HiSCORE
- 6 .Подготовка расширения установки TAIGA-10