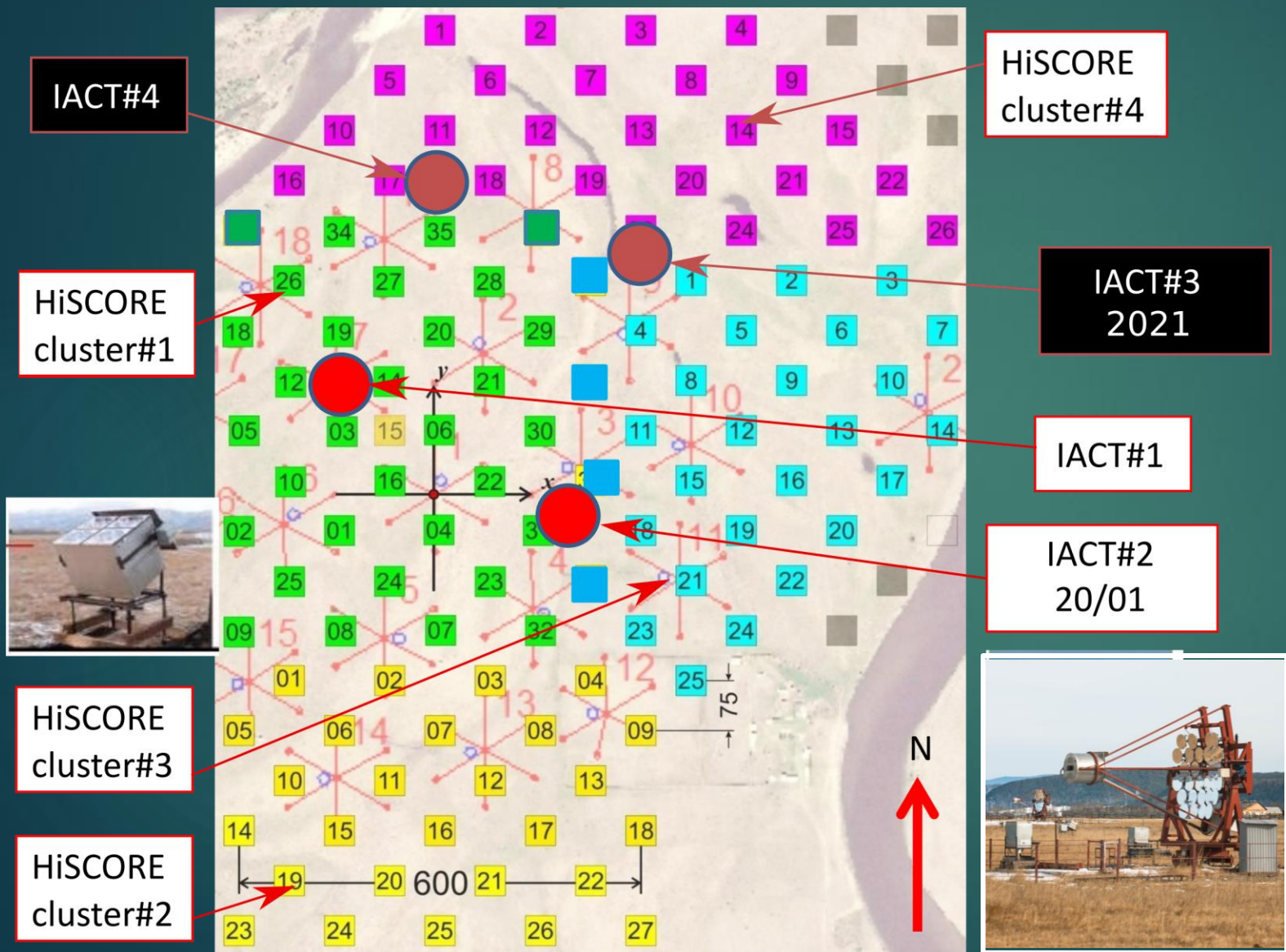


Определение эффективности  
регистрации одиночных мюонов  
атмосферным черенковским телескопом  
установки TAIGA-IACT

*П. Волчугов, Н. Лубсандоржиев, Р. Монхоев от  
коллаборации TAIGA  
Москва 2020*

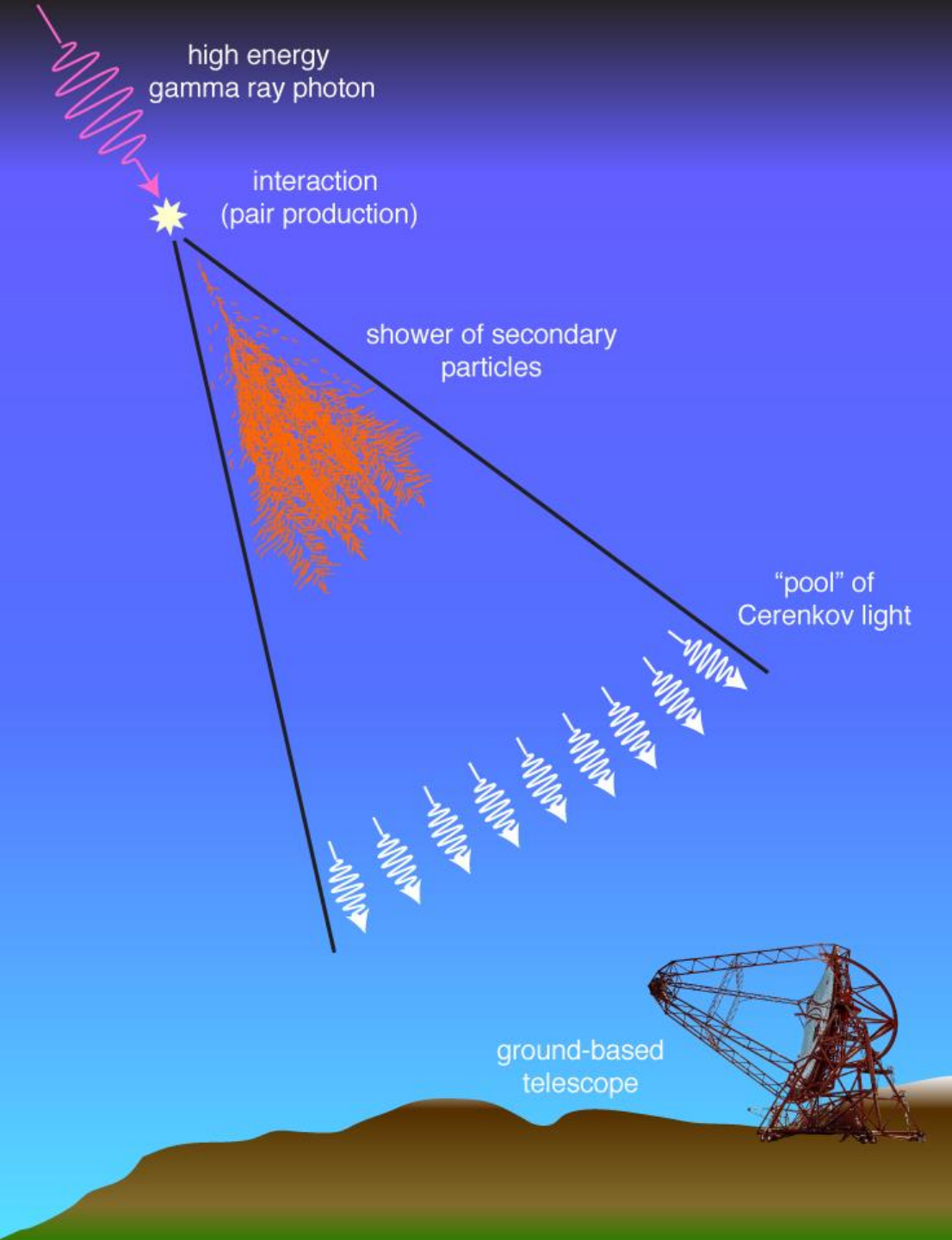
E-mail: [pvol4@ya.ru](mailto:pvol4@ya.ru)  
Skype: pavel38v

# Гамма обсерватория TAIGA[1]



- TAIGA-IACT[2] – атмосферные черенковские телескопы
- TAIGA-HiSCORE [3] – широкоугольная черенковская установка ШАЛ
- TAIGA-Muon [4] – сцинтилляционная установка ШАЛ





# Введение

- ▶ Для того, чтобы с помощью атмосферного черенковского телескопа можно было точно определить энергию первичной частицы, на основе детектируемого ШАЛ, связь между зарегистрированным черенковским светом и энергией гамма-квантов должна быть известна с точностью до нескольких процентов.
- ▶ Следовательно, знание общей оптической пропускной способности телескопа, то есть доли черенковского света от ШАЛ, который фактически регистрируется, является важным фактором при анализе данных.
- ▶ Определить оптическую пропускную способность телескопа можно путем регистрации одиночных мюонов

# Почему МЮОНЫ?

- ▶ Мюоны в большом количестве рождаются в атмосфере Земли (в основном при распадах пионов и каонов). Темп счета мюонов с энергией  $> 1$  ГэВ на высоте 700 метров от уровня моря составляет  $\sim 100$  частиц/м<sup>2</sup>
- ▶ Мюон обладает массой в 206 раз большей массы электрона, в связи с чем радиационные потери в атмосфере для него пренебрежимо малы. Способность мюонов сохранять энергию, достаточную для черенковского излучения на протяжении значительной части своего пути в атмосфере, а так же относительно слабое рассеяние, делает их весьма удобным инструментом для проведения калибровки пропускной способности телескопа

# Этапы проведения мюонной калибровки

01

Поиск событий от одиночных мюонов в камере телескопа

02

Определение ударного параметра мюона относительно отражателя

03

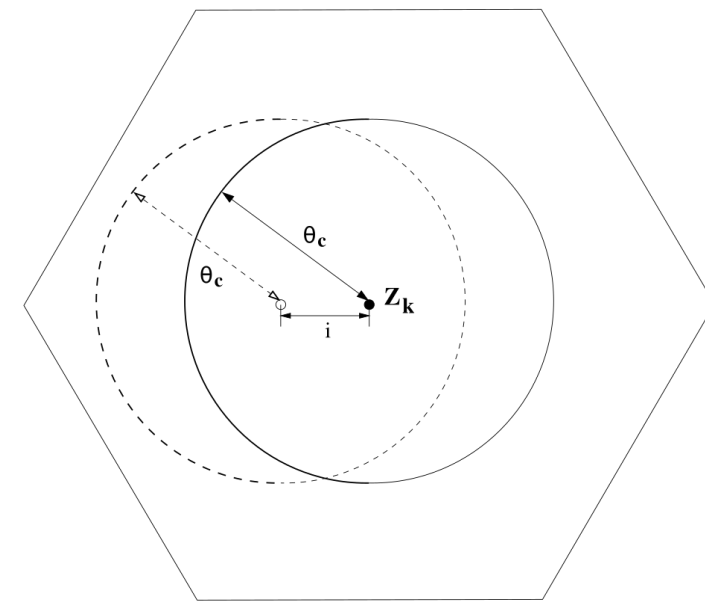
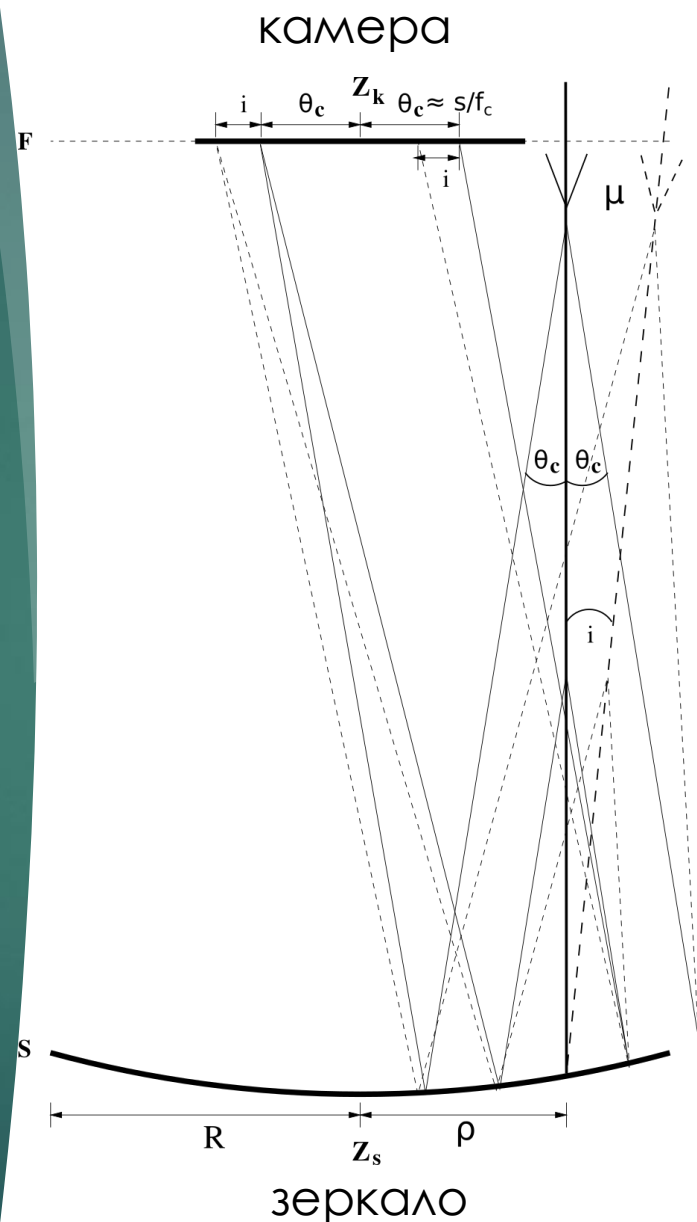
Расчет числа черенковских фотонов, индуцированных одиночным мюоном в атмосфере

04

Сравнение расчетного числа фотонов с зарегистрированным камерой телескопа

# Поиск событий от одиночных мюонов в камере телескопа

- ▶ Одиночные мюоны формируют в камере телескопа изображения в форме колец, если ударный параметр меньше радиуса отражателя, и дуг, если ударный параметр больше радиуса отражателя



изображение в камере

# Поиск событий от одиночных мюонов в камере телескопа

- ▶ В начале 2018 года для регистрации одиночных мюонов был реализован мюонный телескоп
- ▶ Темп счета совпадений с камерой составлял  $\approx 0.006$  Гц (в 28 раз меньше ожидаемого), при этом из 108 зарегистрированных за один сеанс событий, только 4 содержали характерные для мюонов дуги.



## Поиск событий от ОДИНОЧНЫХ МЮОНОВ в камере телескопа

- ▶ Для увеличения эффективности отбора мюон-подобных событий производился независимый отбор посредством поиска изображений дуг и колец среди регистрируемых камерой событий.
- ▶ Для этой цели проводился параллельный расчет параметров колец с помощью формулы Chaudhuri-Kundu[6] и посредством преобразования Хафа[7]. События, для которых параметры определялись одинаково, отбирались для дальнейшего анализа
- ▶ В результате, за 2 часа наблюдений, было выделено 32 события содержащих кольца и дуги.



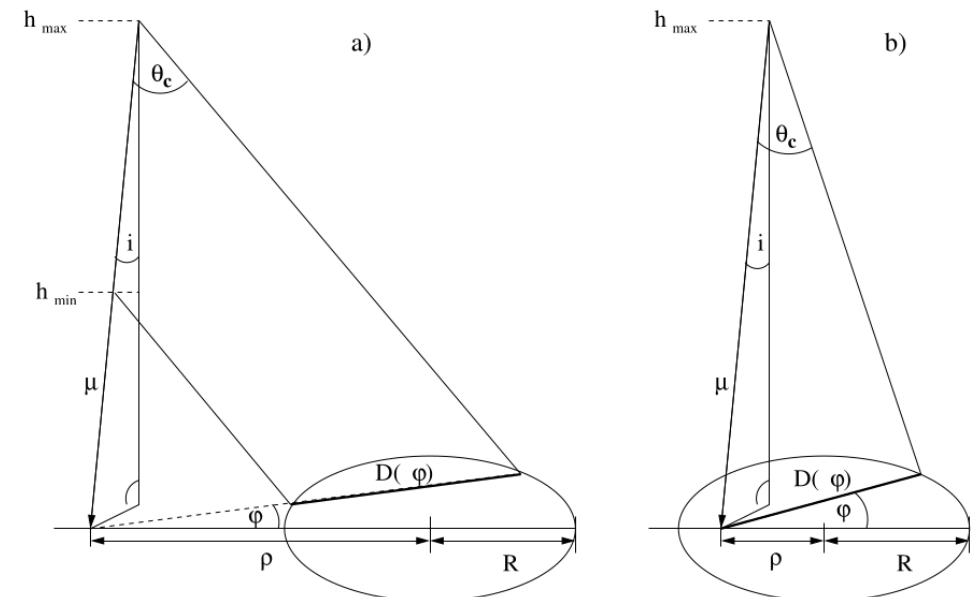
# Определение ударного параметра мюона и эффективности его регистрации

- ▶ Для каждого наблюдаемого в эксперименте азимутального профиля распределения света в кольце, путем минимизации функции хи-квадрат, подбирается аналогичный расчетный профиль распределения света с заданным ударным параметром и параметром эффективности регистрации [5]

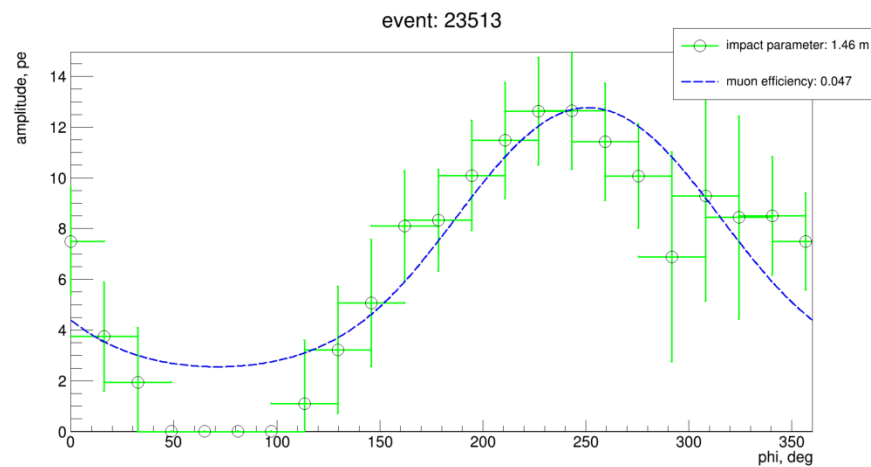
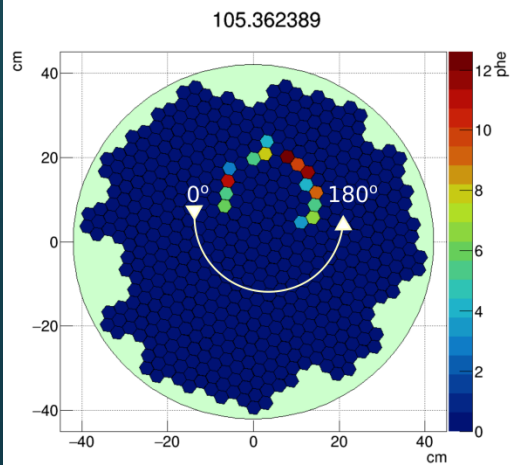
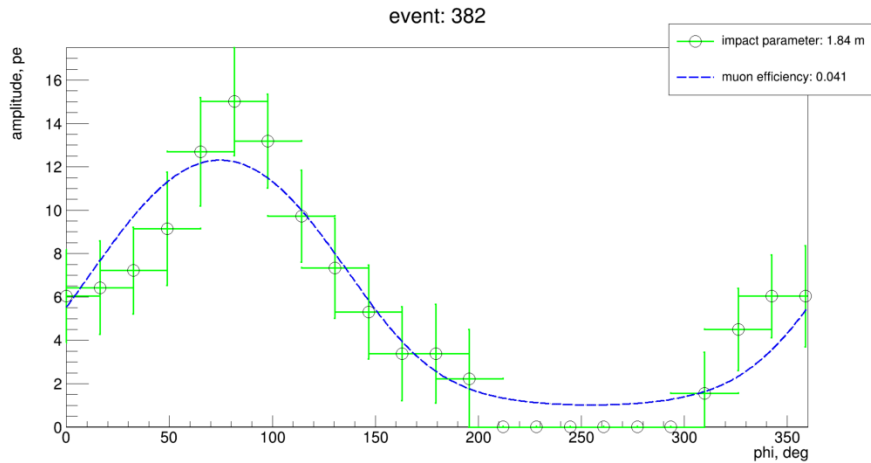
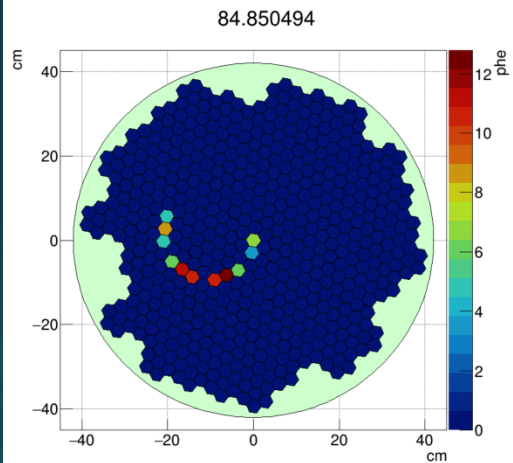
$$I_{pix} = I(\theta, \rho, \phi) = \frac{1}{2} \alpha I \frac{\omega}{\theta_c} \sin(2\theta_c) D(\rho, \phi)$$

$$\chi^2(\rho, \phi_0) = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 \sigma_i^2$$

$$\epsilon_i = I_i^m(\theta, \rho, \phi_i) - I_i^t(\Psi, \theta, \rho, \phi_i - \phi_0)$$



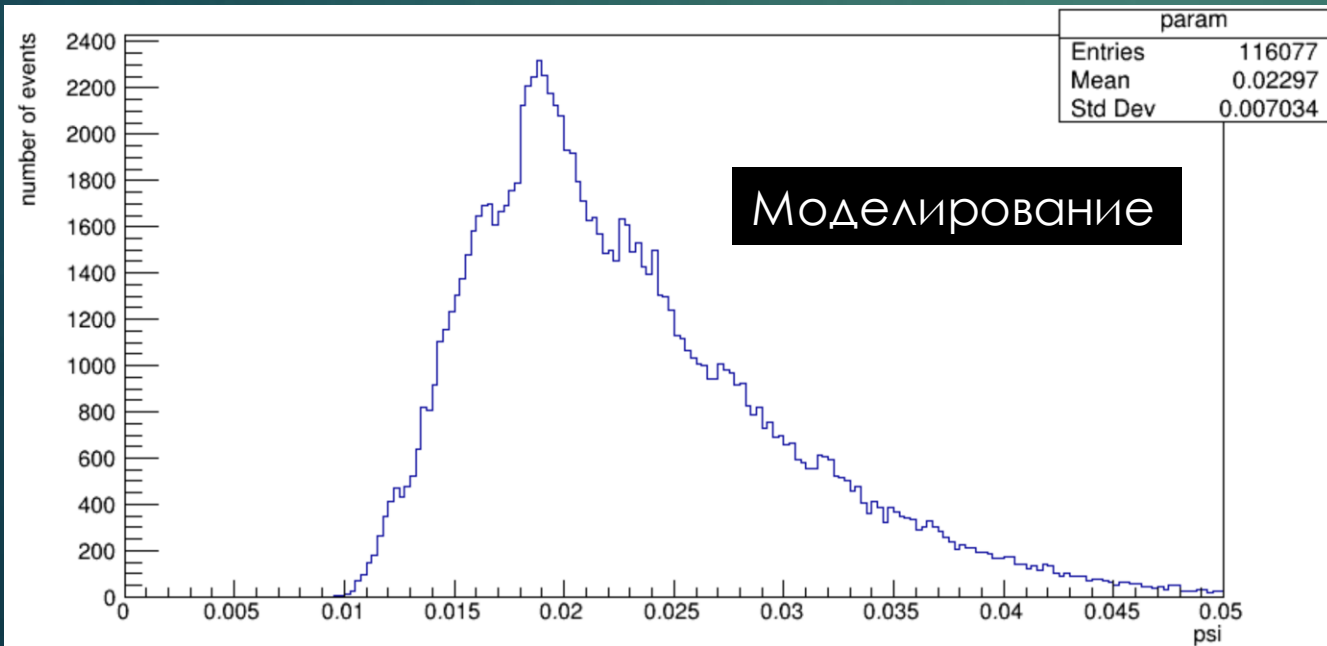
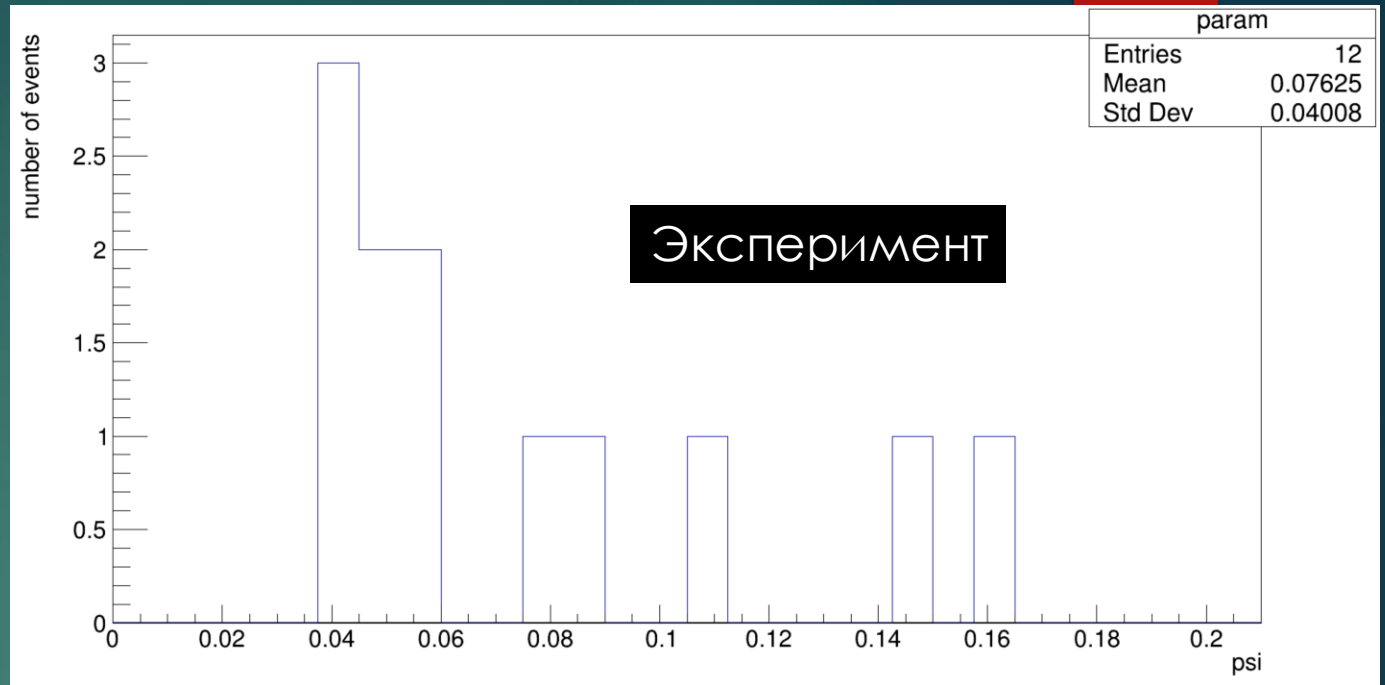
# Определение ударного параметра мюона и эффективности его регистрации



- ▶ Слева: примеры отобранных мюон-подобных событий; справа — соответствующие событиям азимутальные профили распределения света: зеленые точки - наблюдаемые усредненные амплитуды пикселей. Синяя кривая — расчетная функция распределения света в кольце, параметры которой получены в результате минимизации функции хи-квадрат.

# Распределение эффективности регистрации мюонов

- Из 24 визуально отобранных событий с размером кольца >50%, с помощью процедуры минимизации функции хи-квадрат было отбрано 12 событий с хи-квадрат  $\leq 2$ .



- Аналогичная процедура определения эффективности регистрации была проделана с мюонными событиями из моделирования в интервале энергий 10 - 100 ГэВ, ударными параметрами: 0 - 30 см от телескопа и запуском с высоты 500 г/см<sup>2</sup>. Углы наклона траектории мюона по отношению к оси телескопа: 0–5°, наклон спектра  $\gamma = -1.0$ .

# Заключение

- ▶ Полученные распределения по экспериментальному и модельному коэффициенту эффективности регистрации  $\psi$  позволяют сделать следующий вывод: закладываемая в моделирование эффективность регистрации оказывается слишком низкой для экспериментального подтверждения, поскольку при  $\psi \approx 1.9\%$  наблюдаются исключительно дуги с  $< 50\%$  заполнения кольца.
- ▶ Для подобных событий в моделировании возможно определение  $\psi$ , поскольку известен ударный параметр. Однако это приводит к неоднозначности определения ударного параметра мюона в эксперименте и, следовательно, неверному восстановлению числа черенковских фотонов и эффективности регистрации. Распределение  $\psi_{\text{exp}}$  накладывается на «хвост» распределения  $\psi_{\text{model}}$ , выбирая события с наибольшим сайзом.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Kuzmichev L. A., Astapov I. I., Bezyazeev P. A. et al. TAIGA gamma observatory: Status and prospects // Physics of Atomic Nuclei. — 2018. — Jul. — Vol. 81, no. 4. — P. 497–507. — Access mode: <https://doi.org/10.1134/s1063778818040105>.
2. Lubsandorzhev N., Astapov I., Bezyazeev P. et al. Camera of the first TAIGA-IACT: construction and calibration // Proceedings of 35th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2017). — Sissa Medialab, 2017. — Aug. — Access mode: <https://doi.org/10.22323/1.301.0757>
3. Gress O., Astapov I., Budnev N. et al. The wide-aperture gamma-ray telescope TAIGA-HiSCORE in the Tunka Valley: Design, composition and commissioning // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2017. — Feb. — Vol. 845. — P. 367–372. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.08.031>.
4. Astapov I., Bezyazeev P., Boreyko V. et al. Optimization of electromagnetic and hadronic extensive air shower identification using the muon detectors of the TAIGA experiment // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2020. — Feb. — Vol. 952. — P. 161730. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.12.045>
5. Bolz. O. Diplomarbeit im Studiengang Physik: Kalibration der HEGRA Tscherenkow-Teleskope mit Myon-Ringen. — 1999.
6. Chaudhuri B., Kundu P. Optimum circular fit to weighted data in multi-dimensional space // Pattern Recognition Letters. — 1993. — Jan. — Vol. 14, no. 1. — P. 1–6. — Access mode: [https://doi.org/10.1016/0167-8655\(93\)90126-x](https://doi.org/10.1016/0167-8655(93)90126-x).
7. Tani L. Monitoring the optical quality of the FACT Cherenkov Telescope // arXiv e-prints. — 2020. — Jan. — P. [arXiv:2001.06712](https://arxiv.org/abs/2001.06712). — [2001.06712](https://arxiv.org/abs/2001.06712).