

Магистерская диссертация на тему:
Калибровка интегральной квантовой чувствительности
атмосферных черенковских телескопов установки TAIGA-IACT

Студент М24-114: Горбунов Д.С.

Руководитель работы: Тетерин П.Е.

Научный консультант: Волчугов П.А.

Место выполнения: МГУ имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени
Д.В. Скобельцына, Лаборатория наземной гамма-астрономии

Москва 2026

Цель работы:

Определить интегральную квантовую чувствительность телескопа TAIGA-IACT.

Основные задачи:

- 1) Оценить ожидаемое количество регистрируемых мюонных колец телескопом в единицу времени;
- 2) Разработать алгоритм выделения изображений от одиночных мюонов регистрируемых телескопом TAIGA-IACT;
- 3) Разработать математическую модель распределения интенсивности черенковского излучения по дуге кольца;
- 4) Произвести мюонную калибровку на основании отобранных мюонных колец для моделируемых и экспериментальных событий.

Гамма-обсерватория TAIGA

Гамма-обсерватория TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy) нацелена на решение актуальных вопросов гамма-астрономии и физики космических лучей. Комплекс состоит из установок Tunka-133, Tunka-Grande, TAIGA-NiSCORE, TAIGA-MUON, TAIGA-IACST.

Параметры телескопа TAIGA-IACST:

$R_{mir} = 2,15$ м – радиус зеркала

$F = 4,75$ м – фокусное расстояние

$h = 700$ м – высота над уровнем моря

$N_{\text{пиксель}} = 600$ – общее число пикселей
в фокальной плоскости телескопа

$D_{\text{пкс}} = 3$ см = $0,36^\circ$ – размер пикселя

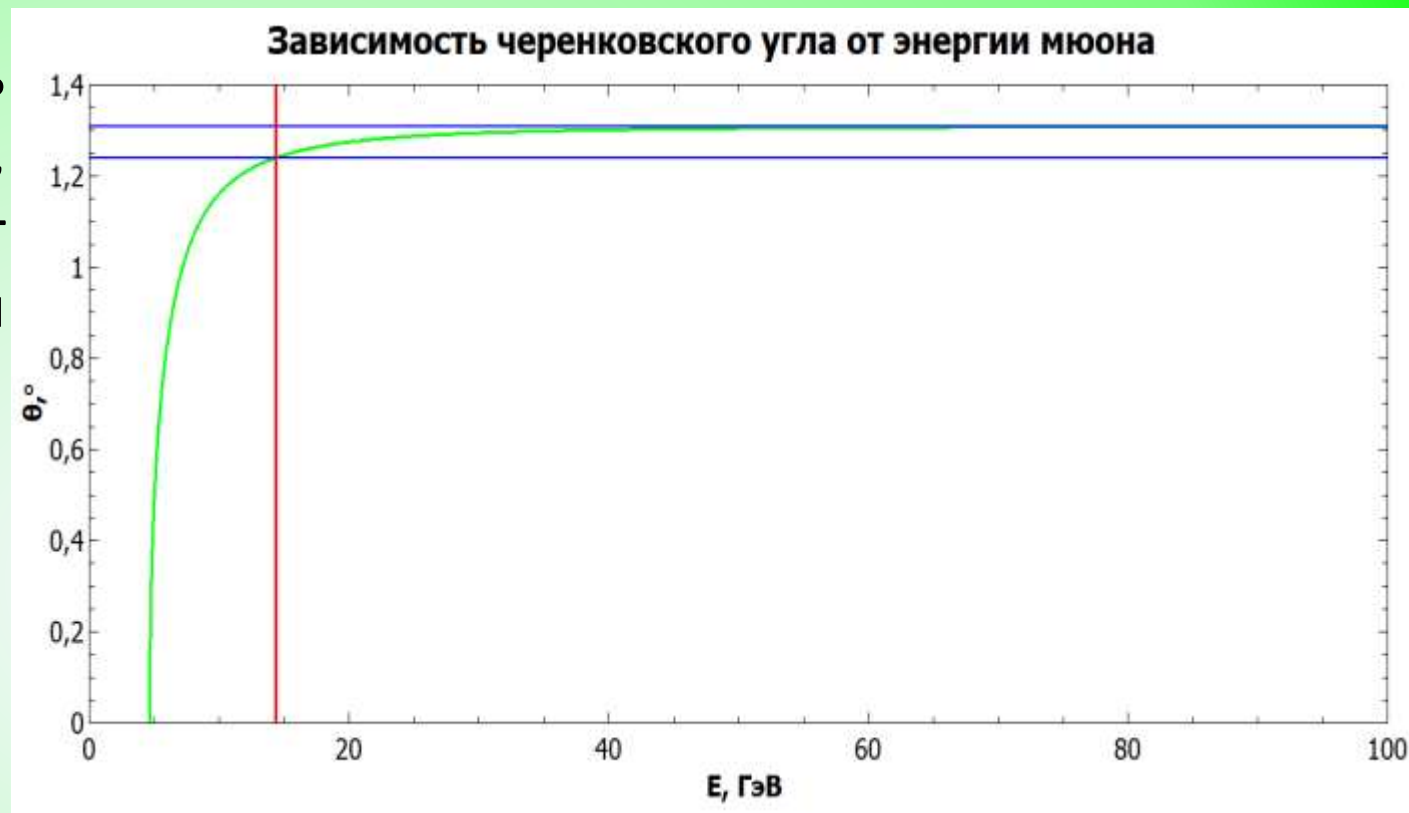
$i = 4,8^\circ$ – угловой радиус поля зрения



Фотография первых двух телескопов TAIGA-IACST

Предельно допустимая для анализа энергия мюонов

Чтобы отбирать и анализировать события от одиночных мюонов важно, чтобы черенковский угол не зависел от их энергии, что наблюдается при высоких энергиях.



$E_0 = 106$ МэВ – энергия покоя мюонов;

$n = 1,0002614$ – показатель преломления атмосферы на высоте обсерватории;

$\theta_{\text{пред}} = 1,31^\circ$ – предельный угол черенковского излучения;

$p = 5\%$ – предельно допустимое отклонение черенковского угла;

$\theta_{\text{крит}} = 1,24^\circ$ – минимально допустимый для анализа черенковский угол;

$E_{\text{крит}} = 14,4$ ГэВ – минимально допустимая для анализа энергия мюонов;

$E_{\text{порог}} = 4,6$ ГэВ – пороговая энергия мюонов.

Оценка ожидаемого количества одиночных мюонов

На основании справочных данных* с помощью линейной интерполяции был получен поток одиночных мюонов в единицу времени в единицу телесного угла на единичную площадку для найденной ранее минимально пригодной энергии:

$$\text{Для } E > E_{\text{крит}} = 14,4 \text{ ГэВ} \Rightarrow \left(\frac{dN_{\mu}}{dS d\Omega dt} \right)_{\text{крит}} = 4,610 \frac{\text{мюон}}{\text{м}^2 * \text{ср} * \text{с}}$$

Интегрированием по всей площади зеркала телескопа и соответствующему ей телесному углу был получен поток одиночных мюонов в единицу времени:

$$\left(\frac{dN_{\mu}}{dt} \right)_{\text{крит}} = \left(\frac{dN_{\mu}}{dS d\Omega dt} \right)_{\text{крит}} (1 - \cos \theta_{\text{пред}}) 2\pi^2 R_{\text{mir}}^2 = 0,110 \frac{\text{мюон}}{\text{с}} = 7 \frac{\text{мюон}}{\text{мин}} = 396 \frac{\text{мюон}}{\text{час}}$$

* De Pascale M. P., Morsell A., P. Picozza et al. Absolute Spectrum and Charge Ratio of Cosmic Ray Muons in the Energy Region From 0.2 GeV to 100 GeV at 600 m Above Sea Level // Journal of geophysical research, Vol. 98, no. A3, Pages 3501 – 3507, March 1, 1993.

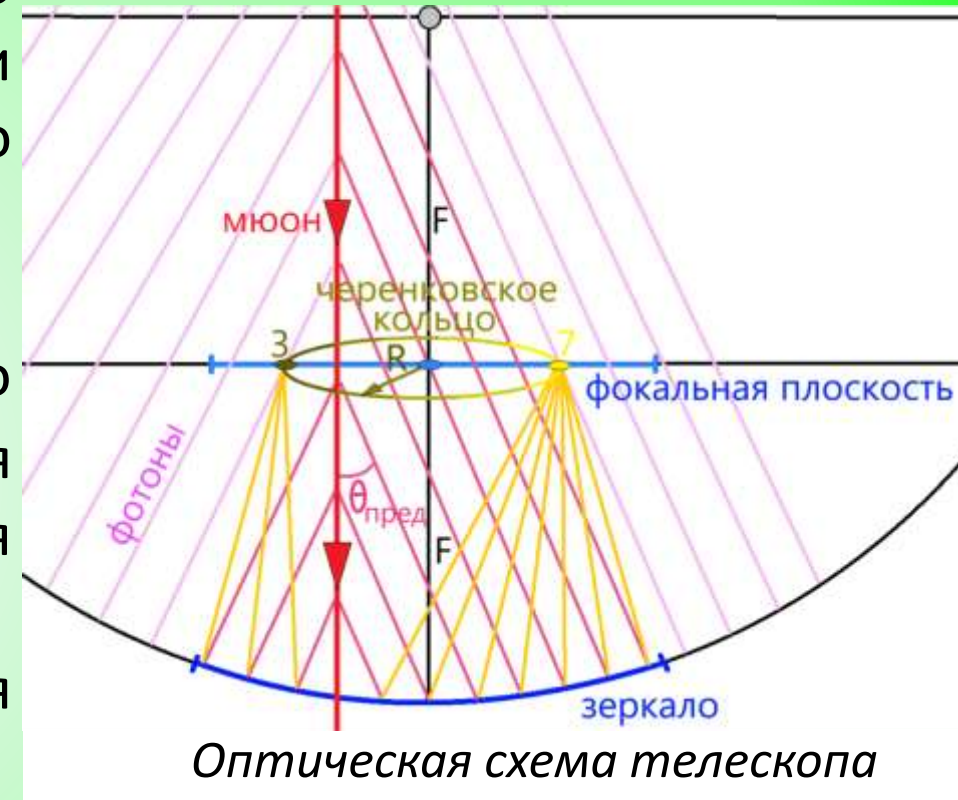
Выделение событий от одиночных мюонов

Проекцией черенковского конуса на плоскость зеркала является круг, который после прохождения сферического зеркала преобразуется в кольцо в фокальной плоскости телескопа. Исходя из оптической схемы телескопа можно найти её радиус:

$$R_{\text{пред}} = F \tan \theta_{\text{пред}} = 10,86 \text{ см}$$

Начиная с энергии $E_{\text{крит}} = 14,4 \text{ ГэВ}$, радиус колец можно считать постоянным. Однако на практике, детектируется и множество других событий, вызванных ШАЛ. Для отбора корректных событий используется три критерия:

- ❑ **Критерий величины радиуса** – допускается отклонение от теоретического значения в $R_0 = 2 \text{ см}$;
- ❑ **Критерий равномерности окружности** – отбираются кольца со средним относительным отклонением точек от среднего значения радиуса не больше $\delta_H = 20\%$;
- ❑ **Критерий длины дуги** – из геометрических соображений она должна быть больше 180° .



Критерии величины радиуса и равномерности окружности

Для определения радиуса колец используются два метода:

❑ **Грубый метод** – путём усреднения координат пикселей находится центр кольца и затем путём усреднения расстояний от пикселей до этого центра находится радиус кольца R и относительное отклонение пикселей δ_R ;

❑ **Преобразование Хафа** – фазовое пространство координат пикселей разбивается на прямоугольные области, в каждой из которых считается радиус черенковского кольца R_H . Прямоугольник, обладающий наименьшим относительным отклонением δ_H , считается центром кольца. Данный метод требует значительно больших вычислительных мощностей по сравнению с грубым.

Событие №40-643 [эксперимент] (верхнее):

$R = 8,87 \text{ см}, \delta_R = 27\%$

$R_H = 9,82 \text{ см} > 10,86 \text{ см} - 2 \text{ см} \Rightarrow$ выполнен

$\delta_H = 14\% < 20\% \Rightarrow$ выполнен

Событие №9-8 [эксперимент] (нижнее):

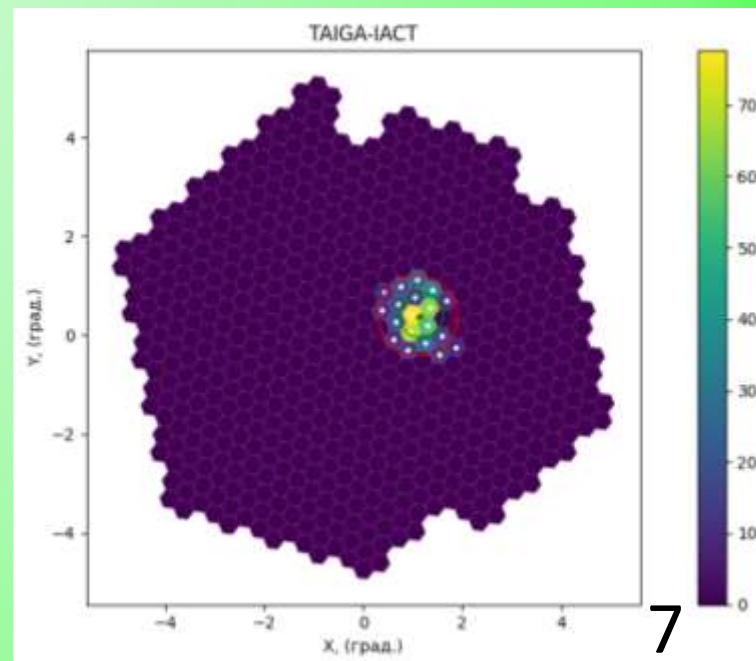
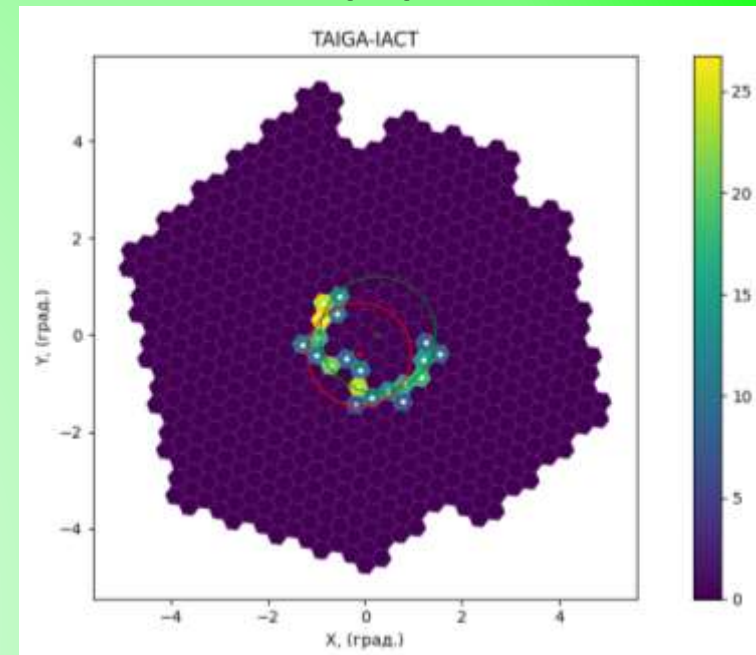
$R = 6,66 \text{ см}, \delta_R = 46\%$

$R_H = 3,72 \text{ см} < 10,86 \text{ см} - 2 \text{ см} \Rightarrow$ НЕ выполнен

$\delta_H = 50\% > 20\% \Rightarrow$ НЕ выполнен

$$|R_H - R_{\text{пред}}| < R_0$$

$$\delta_H < 20\%$$



Критерий длины дуги черенковского кольца



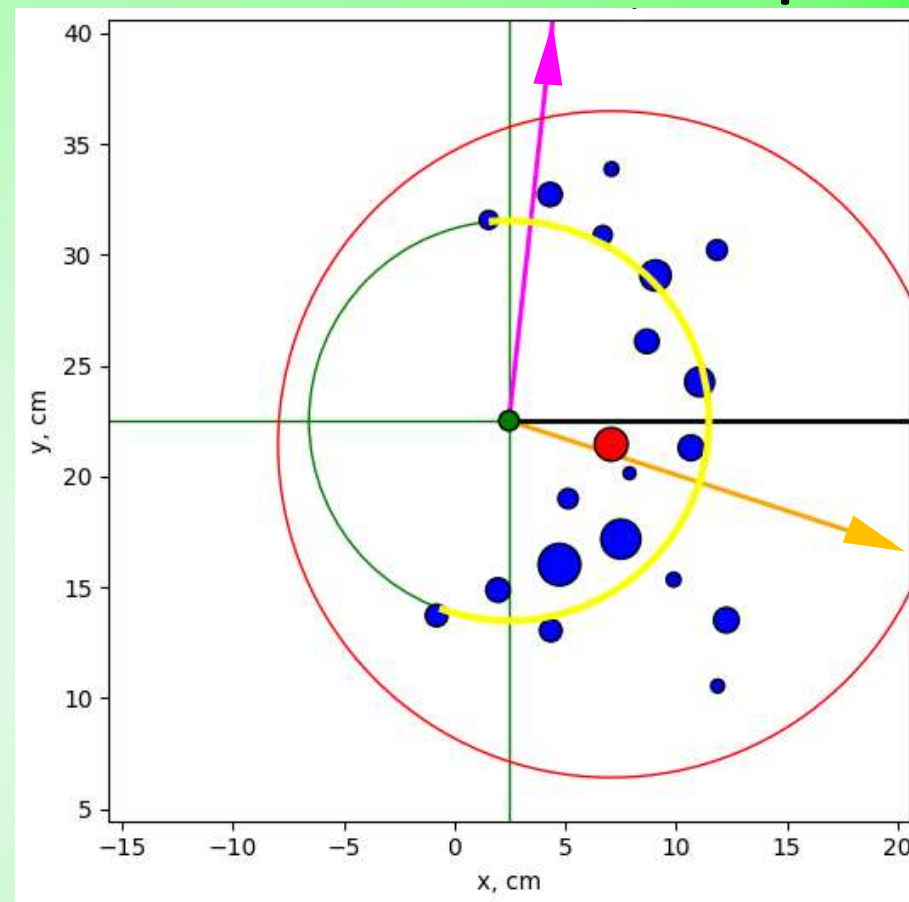
Событие №1-37 [эксперимент]:

$$\omega_{c\,start} = 90^\circ$$

$$\omega_{c\,finish} = 166^\circ$$

$$\Delta\omega_{arc} = 76^\circ < 180^\circ$$

критерий НЕ выполнен



Событие №6-2 [эксперимент]:

$$\omega_{c\,start} = -110^\circ$$

$$\omega_{c\,finish} = 96^\circ$$

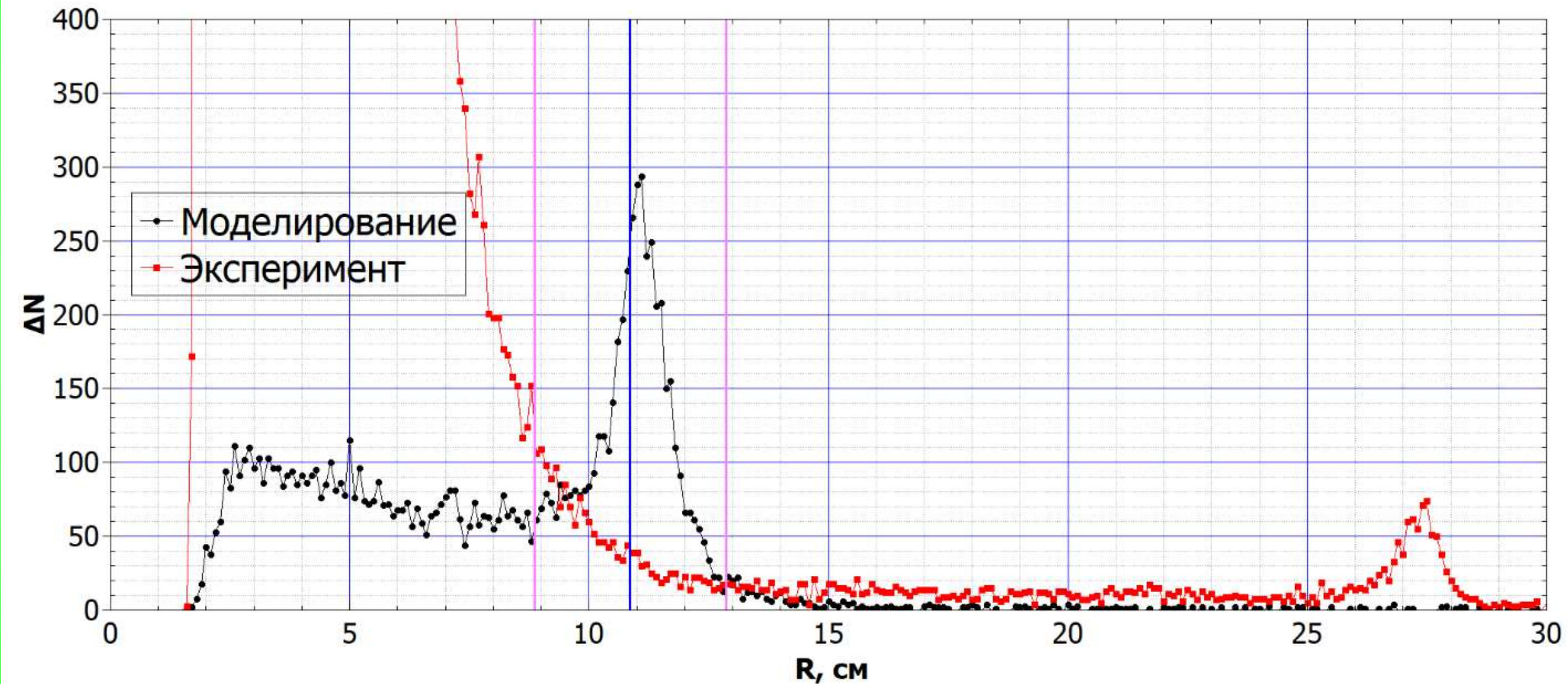
$$\Delta\omega_{arc} = 206^\circ > 180^\circ$$

критерий выполнен

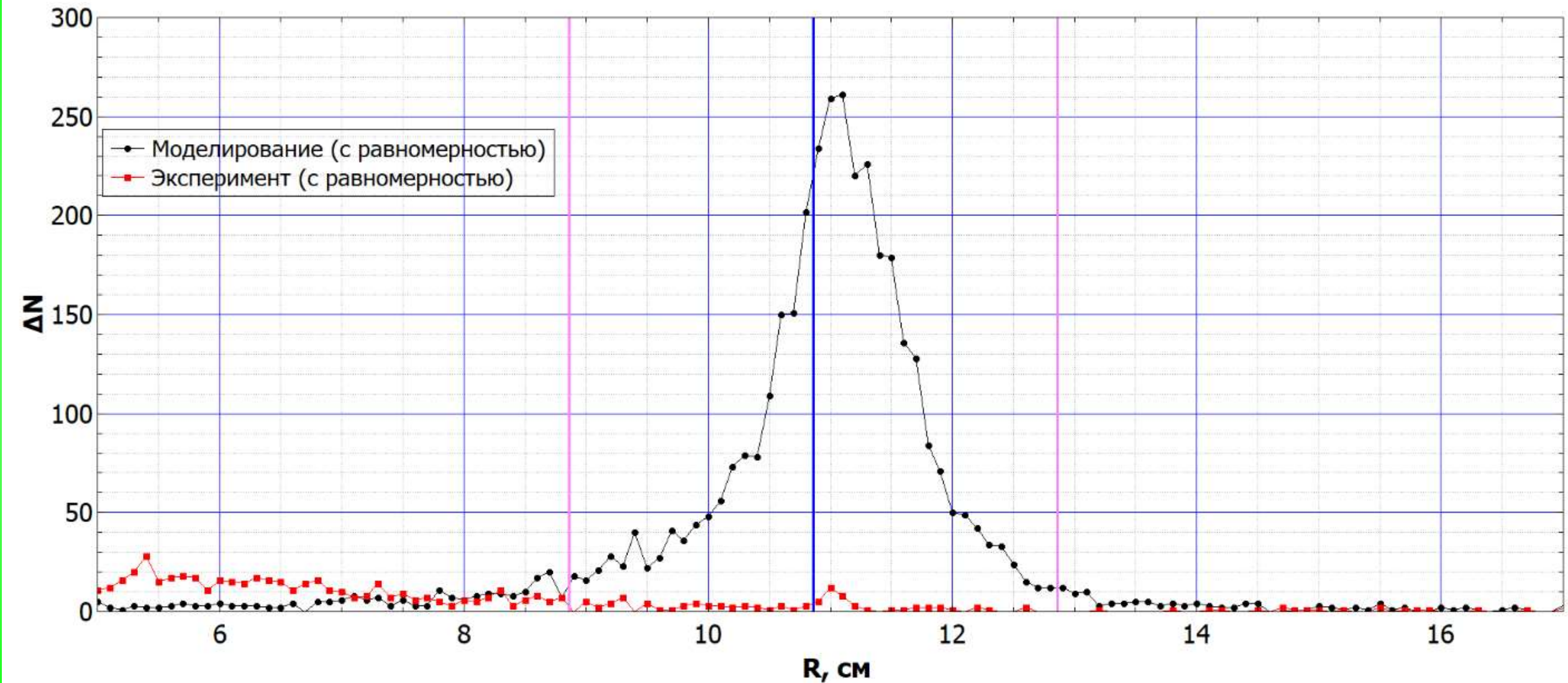
Результаты отбора колец

Критерий	Моделирование	%	Эксперимент	%
Наблюдаемые события	Только мюоны	-	Мюоны и ШАЛы	-
Всего событий брошено	1 060 200	100	-	-
Прошло триггер телескопа	100 000	9	3 982 486	100
Прошло минимизацию	79 631	8	3 094 802	78
Отбор по дуге	4 591	0,4	244 022	6
Отбор по радиусу	15 027	1,4	297 064	7
Двойной отбор	1 068	0,10	1 826	0,05

Распределение колец по радиусу (без равномерности)



Распределение колец по радиусу (с равномерностью)



Формула Тамма-Франка

Интенсивность пикселя черенковского кольца с азимутальным углом ω в случае прохождения мюона на расстоянии ρ от центра зеркала:

$I = I_0 D(\rho, \omega) \Delta\sigma(\rho, \omega) \psi$, где

I_0 – интенсивность пикселей в случае прохождения мюона через центр зеркала;

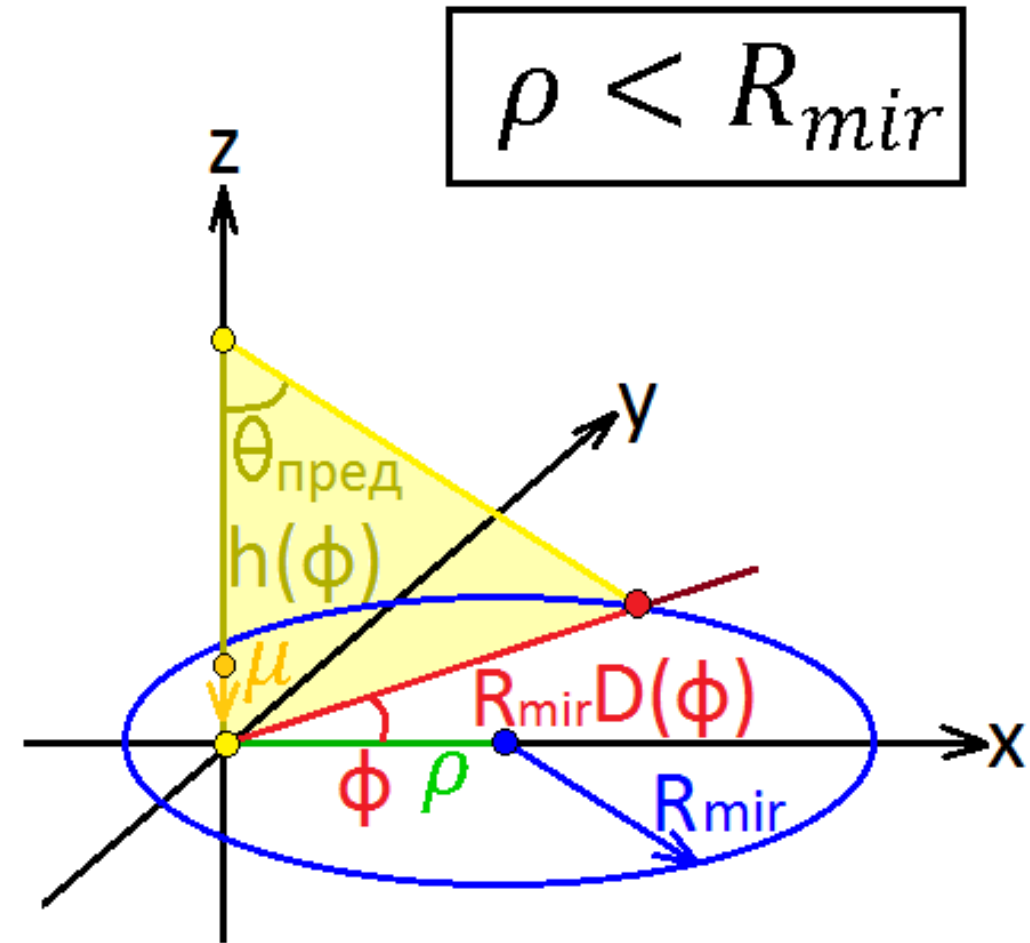
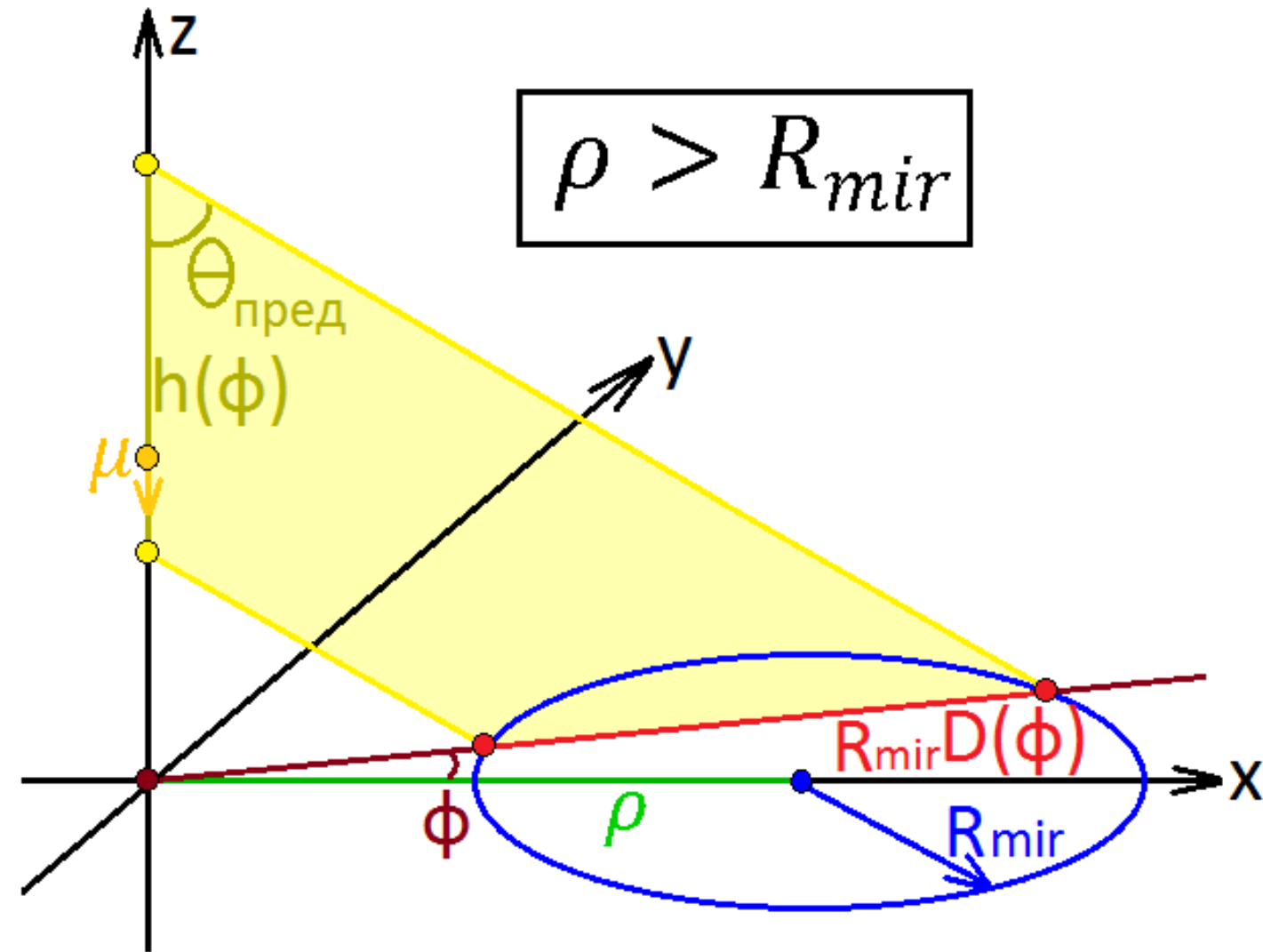
$D(\rho, \omega)$ (хордовая функция) – соответствует длине траектории мюона, свет с которой собирается в один пиксель (от 0 до 2);

$\Delta\sigma(\rho, \omega)$ (сегментная функция) – фактор неравномерности распределения света по пикселям (от 0 до 1);

ψ – интегральная квантовая эффективность оптической системы (от 0 до 1).

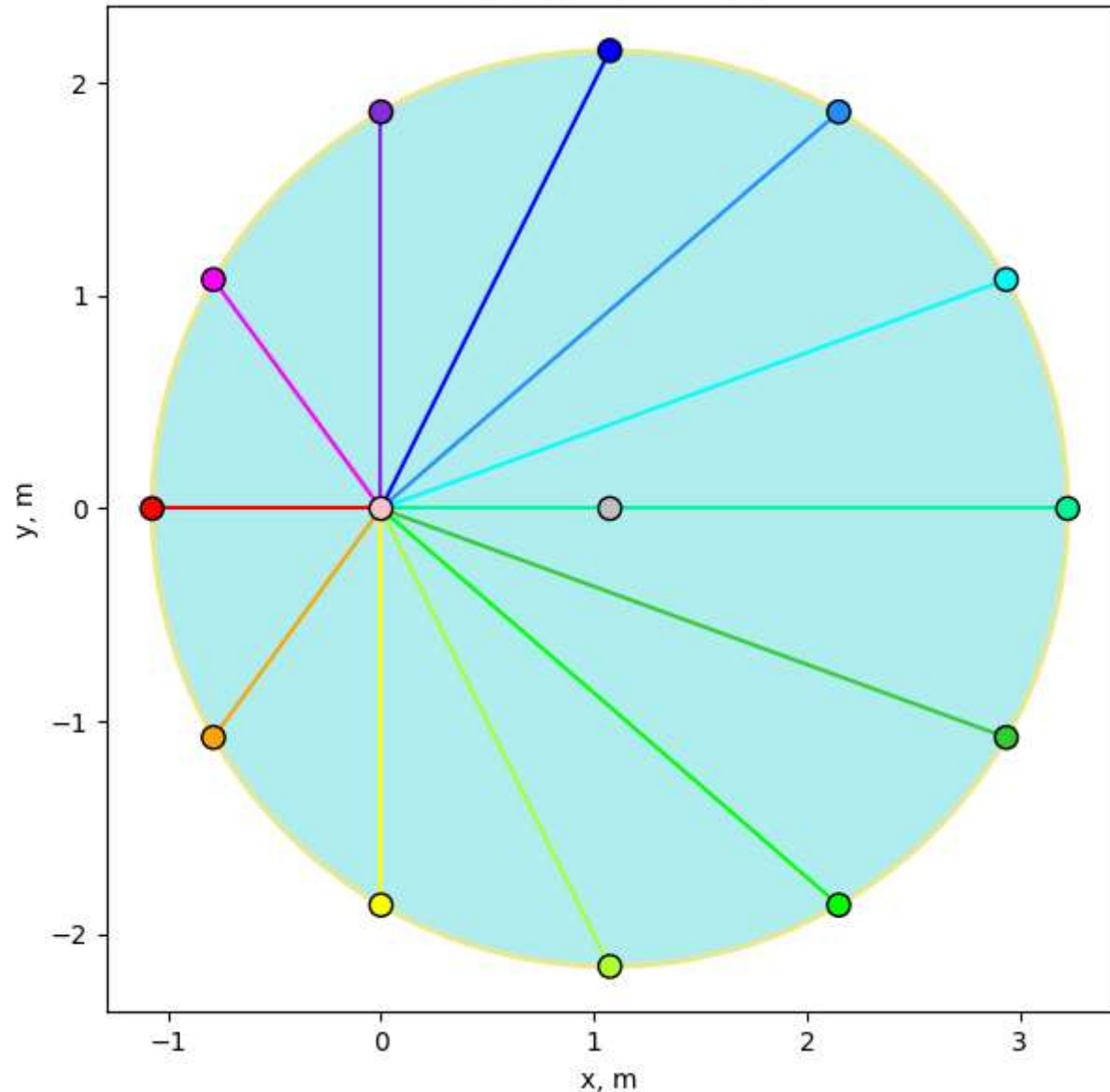
$$I_0 = \pi \alpha R_{mir} \sin 2\theta_{пред} \left(\frac{1}{\lambda_{min}} - \frac{1}{\lambda_{max}} \right) = 1878 \text{ фотонов}$$

Длина траектории мюона, собирающей свет в пикселях

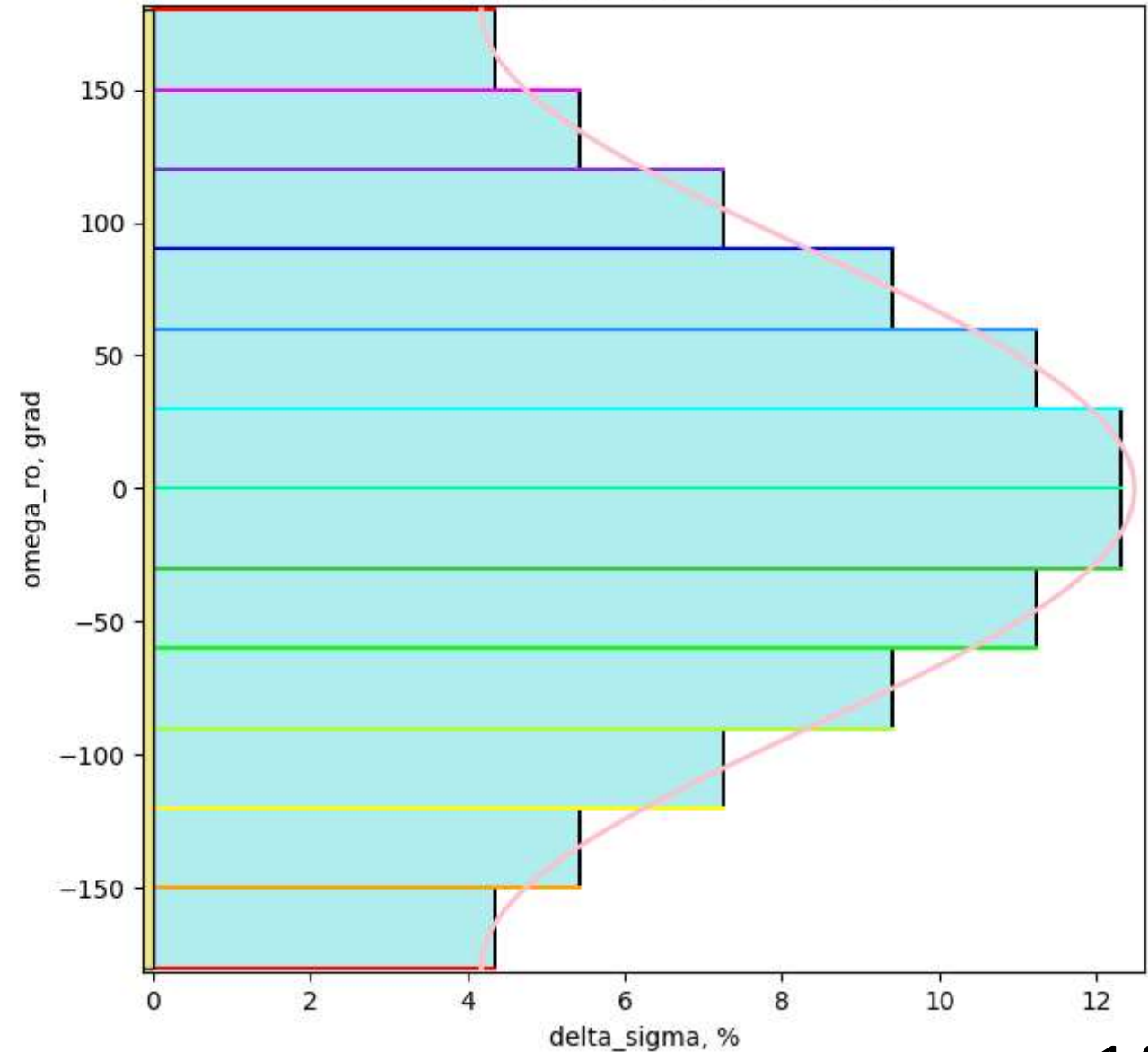


Неравномерность распределения света по пикселям

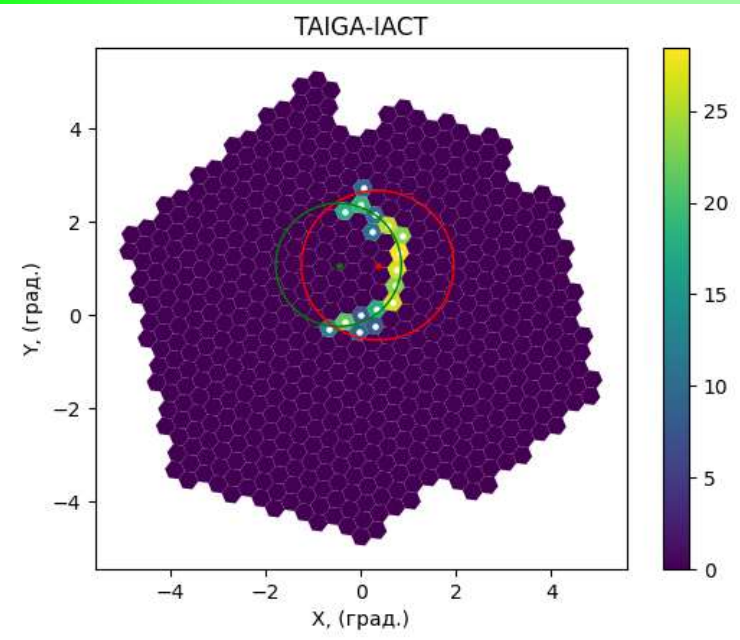
Mirror (ro / R = 0.5)



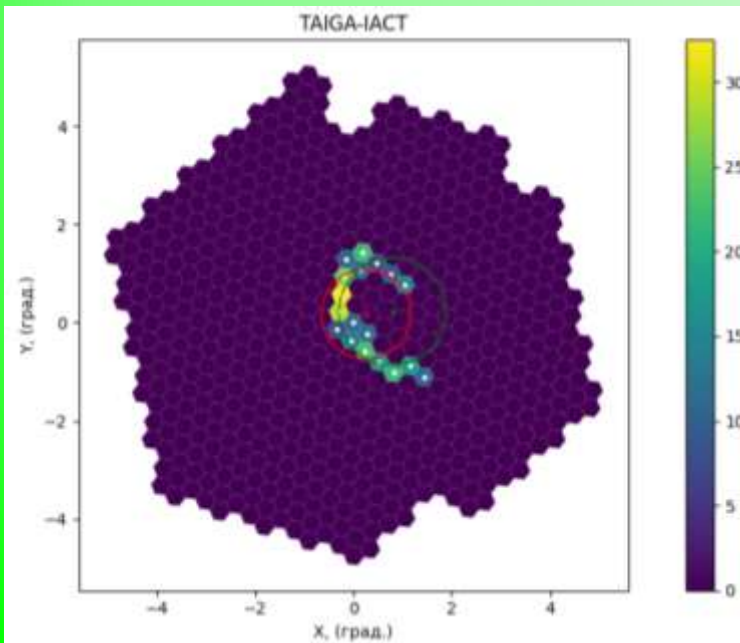
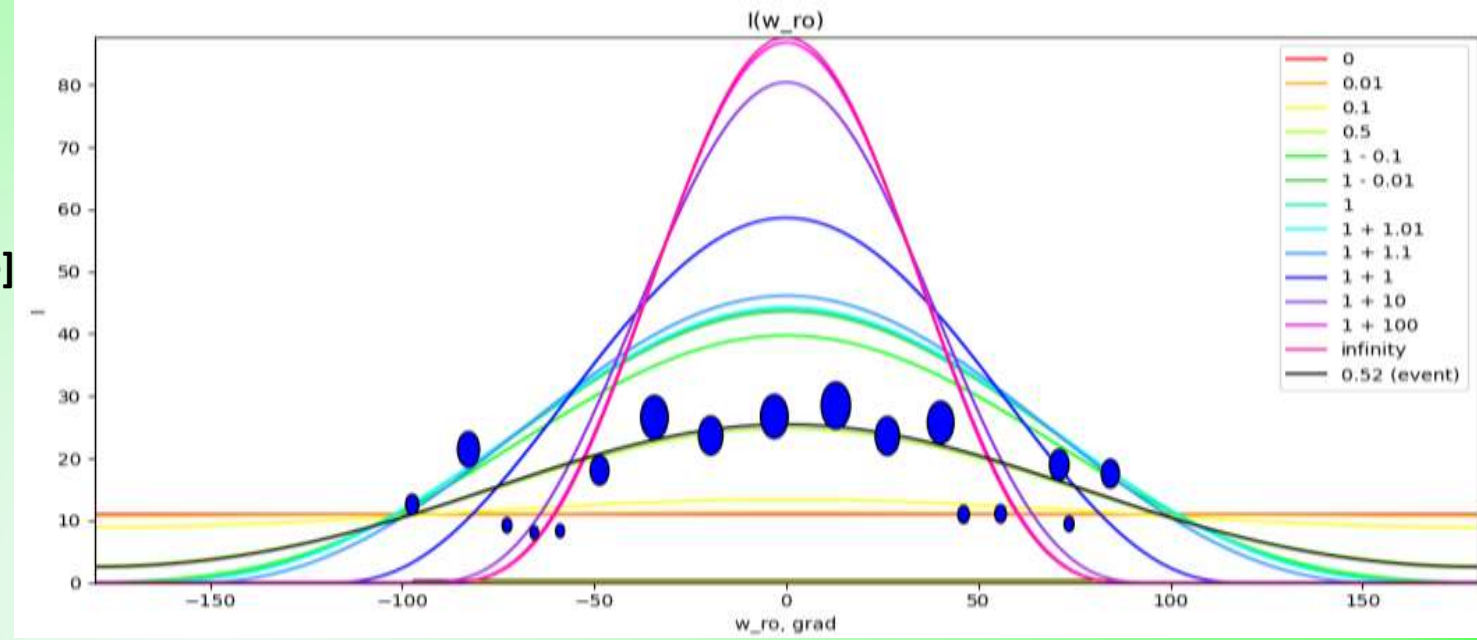
Segment histogram (ro / R = 0.5)



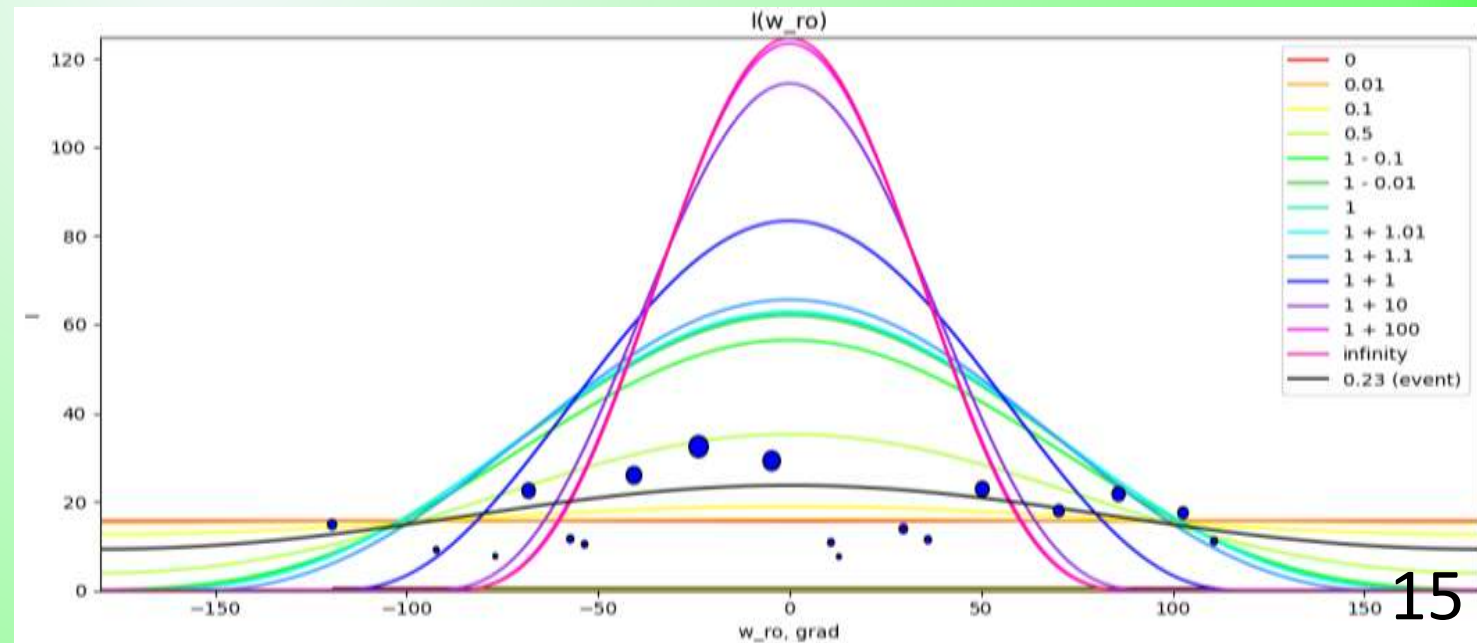
Распределение интенсивности в череновом кольце



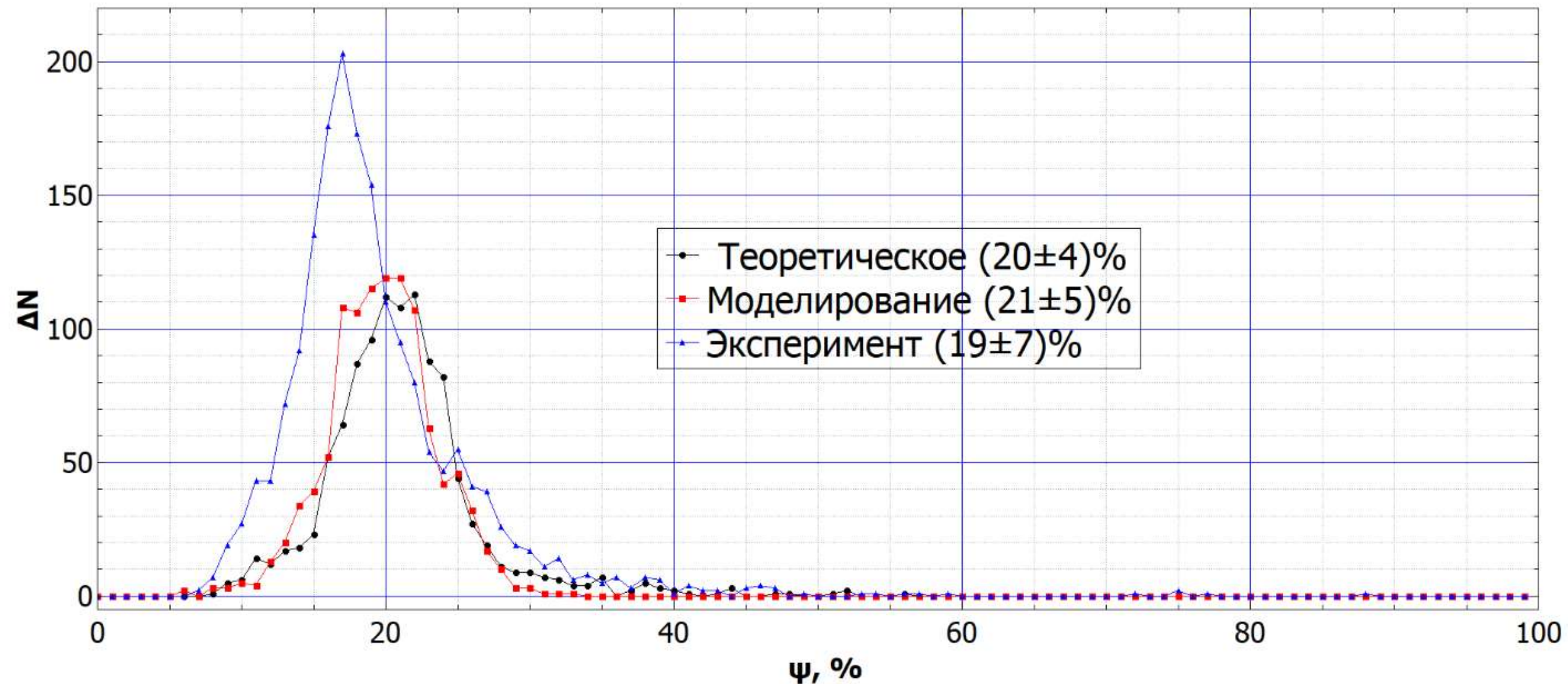
№4128:
[моделирование]
 $\rho = 112$ см
 $\psi = 24\%$
 $\delta_I = 24\%$



№38-382:
[эксперимент]
 $\rho = 49$ см
 $\psi = 19\%$
 $\delta_I = 35\%$



Распределение колец по квантовой эффективности



Заключение

В рамках данной работы:

- было оценено ожидаемое количество регистрируемых мюонных колец телескопом в единицу времени;
- был разработан алгоритм выделения изображений от одиночных мюонов, регистрируемых телескопом TAIGA-IACST;
- была разработана математическая модель распределения интенсивности черенковского излучения по дуге кольца;
- была проведена оценка интегральной квантовой чувствительности третьего телескопа установки TAIGA-IACST по данным эксперимента и моделирования.

На основании аппроксимации распределений квантовой эффективности были получены следующие усреднённые значения этой величины:

- На основании теоретических данных (данных, закладываемых в моделирование): $\psi = 20 \pm 4\%$;
- На основании данных моделирования: $\psi = 21 \pm 5\%$;
- На основании экспериментальных данных: $\psi = 19 \pm 7\%$.

Экспериментальное значение следует рассматривать, как предварительное, для более достоверной оценки необходима дополнительная оптимизация критериев отбора событий. 17

Список использованной литературы

- 1 Kuzmichev L. A., Astapov I. I., Bezyazeekov P. A. et al. TAIGA gamma observatory: Status and prospects // Physics of Atomic Nuclei. 2018. Jul. Vol. 81, no. 4. P. 497.
- 2 Kuzmichev L., Astapov I., Bezyazeekov P. et al. Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy (TAIGA): Status, results and perspectives // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 145. P. 01001. Access mode: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714501001>
- 3 De Pascale M. P., Morsell A., P. Picozza et al. Absolute Spectrum and Charge Ratio of Cosmic Ray Muons in the Energy Region From 0.2 GeV to 100 GeV at 600 m Above Sea Level // Journal of geophysical research, Vol. 98, no. A3, Pages 3501 – 3507, March 1, 1993.
- 4 <https://doi.org/10.5445/IR/270043064>
- 5 Fesefeldt, H.S., PITHA-85-02, 1985, p. 372.
- 6 Ostapchenko, S., Phys. Rev. D, 2011, vol. 83, no. 1, p. 014018.
- 7 A. A. Grinyuk, E. B. Postnikov, and L. G. Sveshnikova, Phys. At. Nucl. 83, 262 (2020).
<https://doi.org/10.1134/s106377882002012x>

Список использованной литературы

- 8 Lubsandorzhiev N., Astapov I., Bezyazeekov 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>.
- 9 Mirzoyan R., Lorenz E., Petry D., Prosch C. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1997. V. 387 (1). P. 74.
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)00964-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)00964-3)
- 10 P. A. Volchugov, A. P. Kryukov, E. O. Gres et al. Influence of IACT Data Preprocessing Methods on the Accuracy of Reconstruction of EAS Parameters // ISSN 1063-7788, Physics of Atomic Nuclei, 2025, Vol. 88, No. 10, pp. 1934–1939. Pleiades Publishing, Ltd., 2025.
- 11 Duda R. O., Hart P. E. Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. Commun. ACM, 1972, vol. 15, no. 1, pp. 11–15.
- 12 R. CHALME-CALVET, M. DE NAUROIS, J.-P. TAVERNET, FOR THE H.E.S.S. COLLABORATION. Muon efficiency of the H.E.S.S. telescope // ATMOHEAD WORKSHOP, 2013.
- 13 Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика, Т.1,2.-М.: Энергоатомиздат, 1996.

Критерий величины радиуса черенковского кольца

Грубый метод оценки радиуса

Центр черенковского кольца:

$$x_c = \frac{\sum_{k=1}^n m_k x_k}{\sum_{k=1}^n m_k}, \quad y_c = \frac{\sum_{k=1}^n m_k y_k}{\sum_{k=1}^n m_k}$$

Радиус кольца для конкретного пикселя:

$$(R_k)^2 = (x_k - x_c)^2 + (y_k - y_c)^2$$

Средний радиус черенковского кольца:

$$R = \frac{\sum_{k=1}^n m_k R_k}{\sum_{k=1}^n m_k}$$

Среднеквадратичное отклонение пикселей:

$$(\Delta R)^2 = \frac{\sum_{k=1}^n m_k (R_k - R)^2}{\sum_{k=1}^n m_k}$$

Относительное среднеквадратичное отклонение:

$$\delta_R = \frac{\Delta R}{R}$$

Критерий величины радиуса

$$|R_H - R_{\text{пред}}| < R_0, R_{\text{пред}} = 10,86 \text{ см}, R_0 = 2 \text{ см}$$

Преобразование Хафа

Область изменения координат:

$$x_{\min} < x < x_{\max}, \quad y_{\min} < y < y_{\max}$$

Диаметр разбиения координат:

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{d}, \quad \Delta y = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{d}$$

Границы частей разбиения:

$$x_i = x_{\min} + i\Delta x, 0 \leq i \leq d$$

$$y_j = y_{\min} + j\Delta y, 0 \leq j \leq d$$

Массив среднеквадратичных отклонений:

$$(R_{i,j,k})^2 = (x_k - x_i)^2 + (y_k - y_j)^2$$

$$R_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^n m_k R_{i,j,k}}{\sum_{k=1}^n m_k}, \quad (\Delta R_{i,j})^2 = \frac{\sum_{k=1}^n m_k (R_{i,j,k} - R_{i,j})^2}{\sum_{k=1}^n m_k}$$

Минимизация среднеквадратичного отклонения:

$$i \cap j: \Delta R_{i,j} = \Delta R_{i,j \min} \Rightarrow \begin{cases} x_c = x_i, & y_c = y_j \\ R_H = R_{i,j}, & \Delta R_H = \Delta R_{i,j} \end{cases}$$

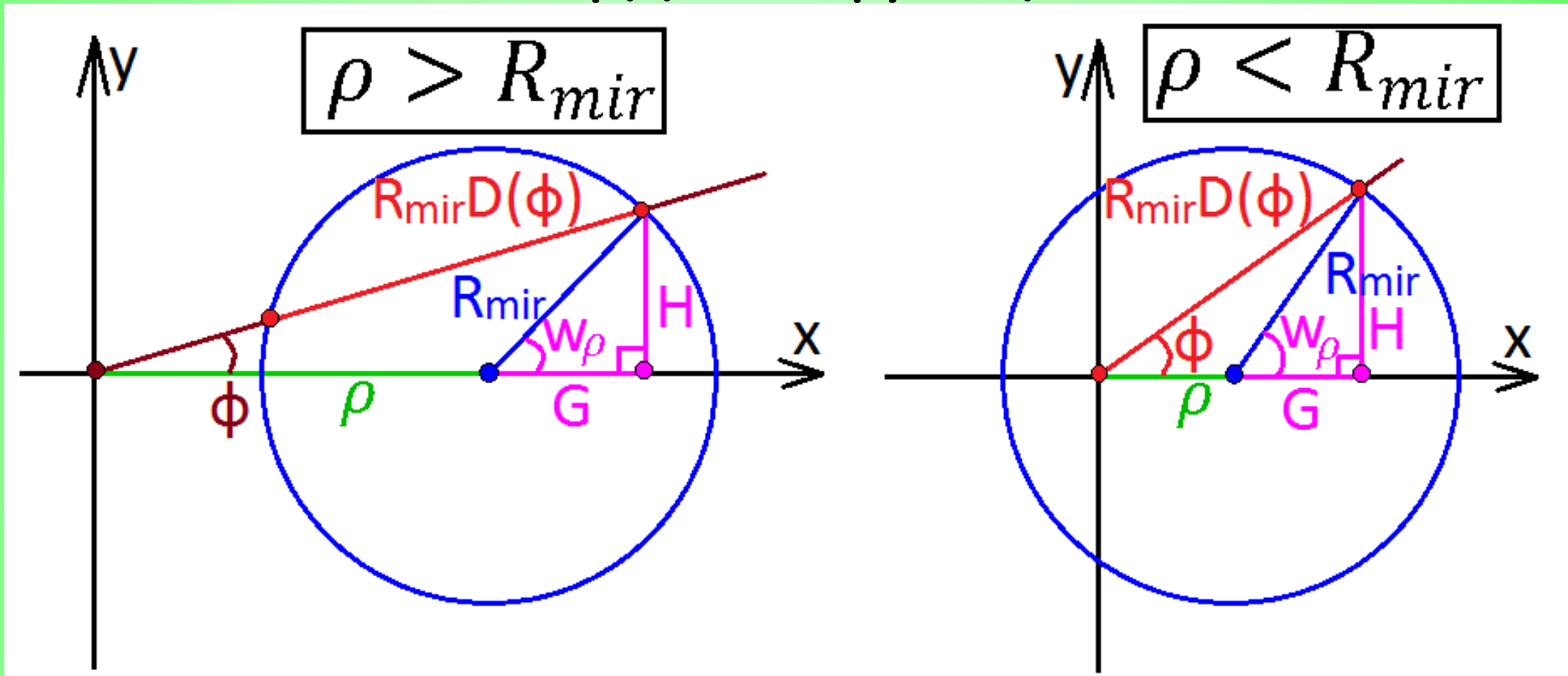
Относительное среднеквадратичное отклонение:

$$\delta_H = \frac{\Delta R_H}{R_H}$$

Алгоритмы аппроксимации

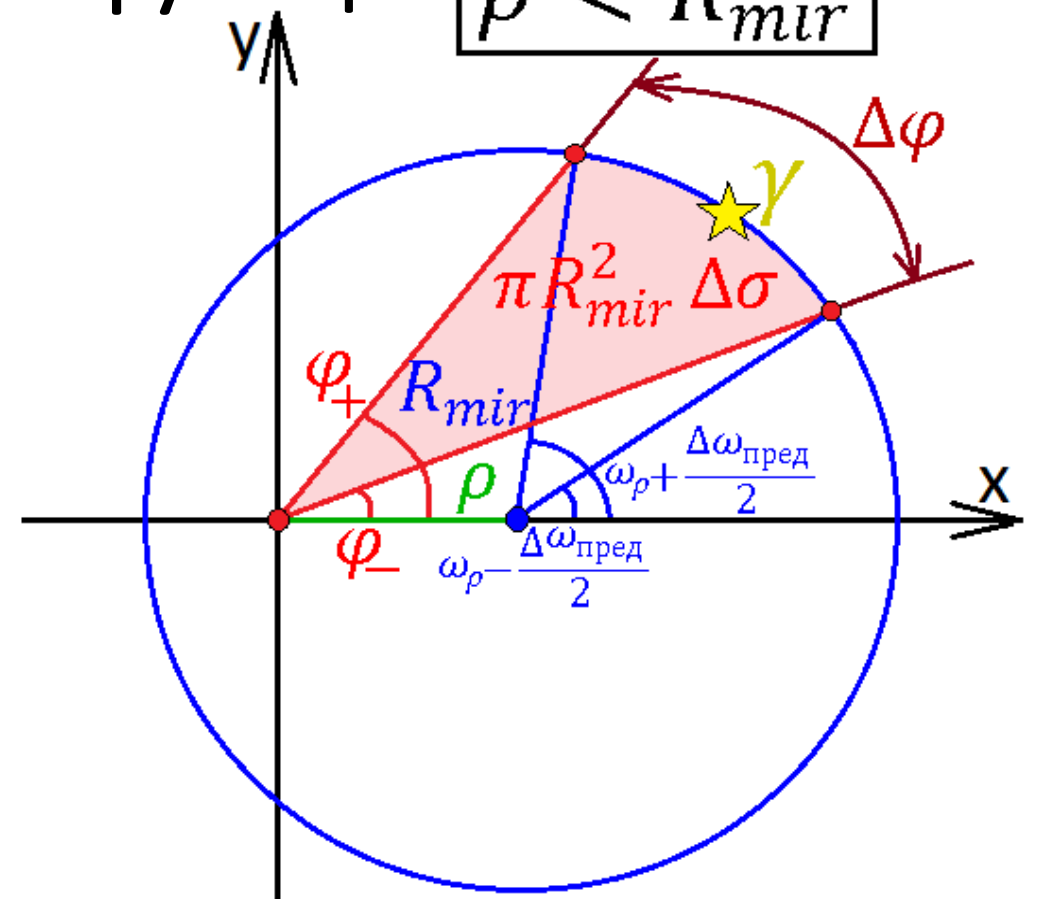
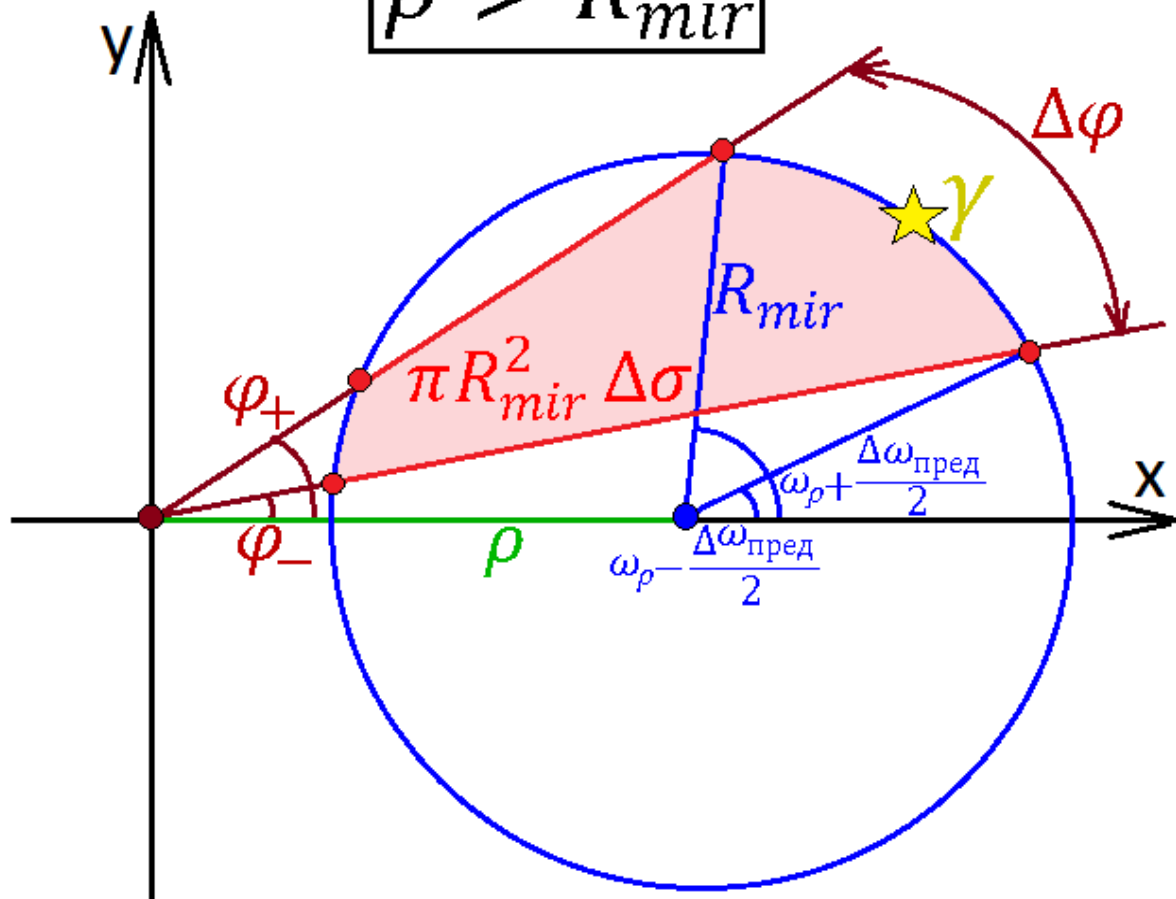
Грубая формула	Преобразование Хафа	Квантовая эффективность
Область изменения переменных		
$x_{min} < x < x_{max}, \quad y_{min} < y < y_{max}$	$x_{min} < x < x_{max}, \quad y_{min} < y < y_{max}$	$0 < \rho < R_{mirror}, \quad 0 < \psi < 1$
Диаметр разбиения		
-	$\Delta x = \frac{x_{max} - x_{min}}{d}, \quad \Delta y = \frac{y_{max} - y_{min}}{d}$	$\Delta \rho = \frac{R_{mirror}}{d}, \quad \Delta \psi = \frac{1}{d}$
Границы частей разбиения		
-	$x_i = x_{min} + i\Delta x, 0 \leq i \leq d, \quad y_j = y_{min} + j\Delta y, 0 \leq j \leq d$	$\rho_i = i\Delta \rho, 0 \leq i \leq d, \quad \psi_j = j\Delta \psi, 0 \leq j \leq d$
Массив среднеквадратичных отклонений		
-	$(R_{i,j,k})^2 = (x_k - x_i)^2 + (y_k - y_j)^2$ $R_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^n m_k R_{i,j,k}}{\sum_{k=1}^n m_k}, \quad (\Delta R_{i,j})^2 = \frac{\sum_{k=1}^n m_k (R_{i,j,k} - R_{i,j})^2}{\sum_{k=1}^n m_k}$	$I_{i,j,k} = I_0 D(\omega_k, \rho_i) \Delta \sigma(\omega_k, \rho_i) \psi_j, \quad (\Delta I_{i,j})^2 = \frac{\sum_{k=1}^n m_k (I_{i,j,k} - m_k)^2}{\sum_{k=1}^n m_k}$
Минимизация среднеквадратичного отклонения		
$x_c = \frac{\sum_{k=1}^n m_k x_k}{\sum_{k=1}^n m_k}, \quad y_c = \frac{\sum_{k=1}^n m_k y_k}{\sum_{k=1}^n m_k}$ $(R_k)^2 = (x_k - x_c)^2 + (y_k - y_c)^2$ $R = \frac{\sum_{k=1}^n m_k R_k}{\sum_{k=1}^n m_k}, \quad (\Delta R)^2 = \frac{\sum_{k=1}^n m_k (R_k - R)^2}{\sum_{k=1}^n m_k}$	$i \cap j: \Delta R_{i,j} = \Delta R_{i,j \min} \Rightarrow \begin{cases} x_c = x_i \\ y_c = y_j \\ R_H = R_{i,j} \\ \Delta R_H = \Delta R_{i,j} \end{cases}$	$i \cap j: \begin{cases} i \neq 0 \cap i \neq d \\ j \neq 0 \cap j \neq d \\ I_{i,j} = I_{i,j \min} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \rho = \rho_i \\ \psi = \psi_j \\ I_k = I_{i,j,k} \\ \Delta I = \Delta I_{i,j} \end{cases}$ $\bar{I} = \frac{\sum_{k=1}^n m_k I_k}{\sum_{k=1}^n m_k}, \quad \bar{m} = \frac{\sum_{k=1}^n m_k}{n}$
Относительное среднеквадратичное отклонение		
$\delta_R = \frac{\Delta R}{R}$	$\delta_H = \frac{\Delta R_H}{R_H}$	$\delta_I = \frac{\Delta I}{\bar{I}}$

Хордовая функция



$$D(\varphi) = \begin{cases} \frac{\rho}{R_{mir}} \cos \varphi + \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{R_{mir}^2} \sin^2 \varphi}, & \rho < R_{mir} \\ 2 \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{R_{mir}^2} \sin^2 \varphi}, & \rho > R_{mir} \end{cases}$$

Сегментная функция



$$\sigma(\varphi) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \left(\varphi + \frac{\rho^2}{2R_{mir}^2} \sin 2\varphi + \arcsin \left(\frac{\rho}{R_{mir}} \sin \varphi \right) + \frac{\rho}{R_{mir}} \sin \varphi \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{R_{mir}^2} \sin^2 \varphi} \right), \rho < R \\ \frac{1}{\pi} \left(\arcsin \left(\frac{\rho}{R_{mir}} \sin \varphi \right) + \frac{\rho}{R_{mir}} \sin \varphi \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{R_{mir}^2} \sin^2 \varphi} \right), \rho > R \end{cases}$$