

Отчет по НИРС на тему: Оценка важных при анализе черенковских колец параметров телескопа TAIGA-IACST

Студент M24-114: Горбунов Д.С.
Руководитель работы: Волчугов П.А.

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

Цель работы:

Определить интегральную квантовую чувствительность телескопа TAIGA-IACT.

Основные задачи:

- 1) Оценить ожидаемое количество регистрируемых мюонных колец телескопом в единицу времени;
- 2) Использовать преобразование Хафа для выделения одиночных мюонов по форме регистрируемых изображений на основе данных моделирования;
- 3) Теоретически найти распределение интенсивности черенковского излучения по дуге кольца;
- 4) Произвести мюонную калибровку на основании отобранных мюонных колец, полученных в рамках моделирования.

Гамма-обсерватория TAIGA

$$R = 2,15 \text{ м}$$

$$F = 4,75 \text{ м}$$

$$h = 700 \text{ м}$$

$$N_{\text{пиксель}} = 600$$

$$D_{\text{пкс}} = 3 \text{ см}$$

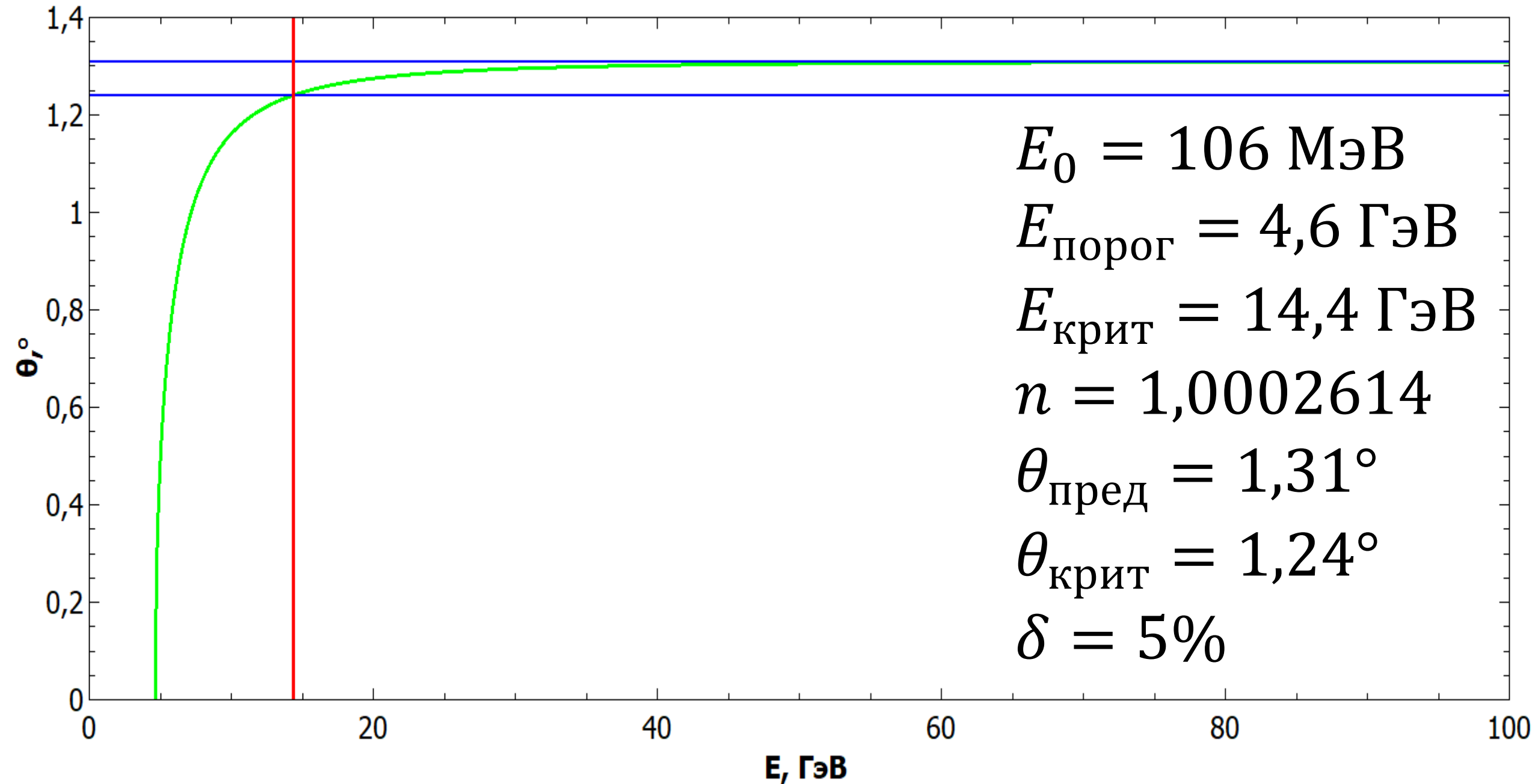
$$D_{\text{пкс}} = 0,36^\circ$$

$$i = 4,8^\circ$$

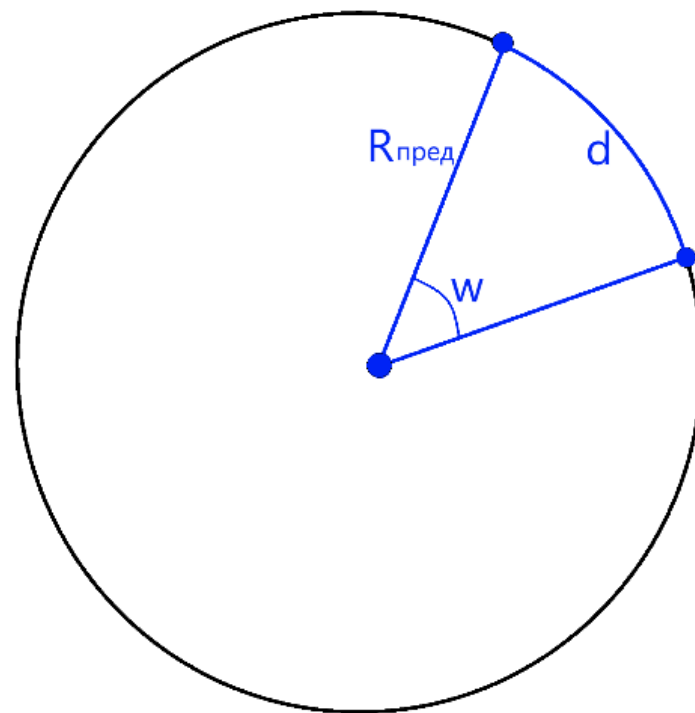
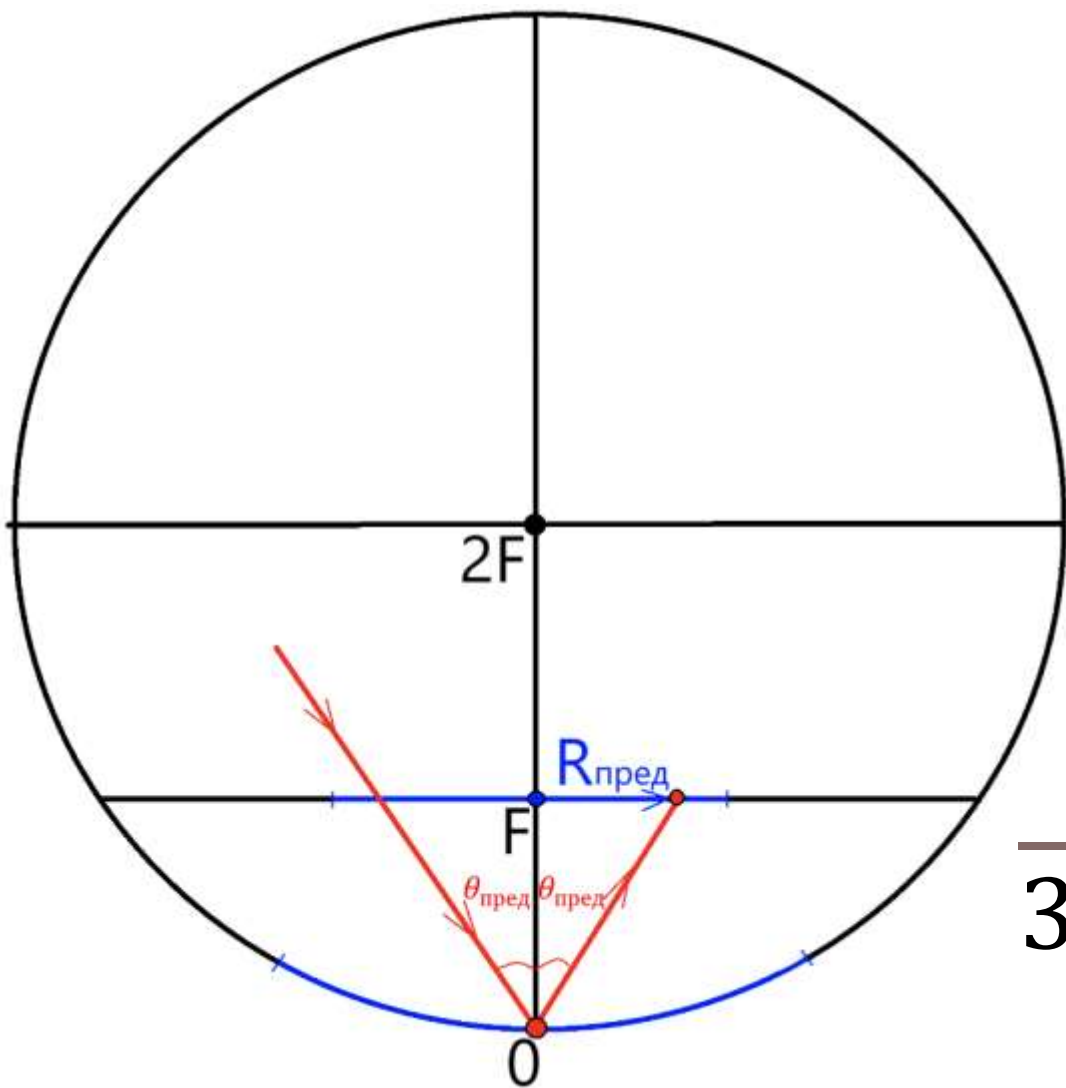


Фотография телескопа в эксперименте TAIGA

Зависимость черенковского угла от энергии мюона



Оценка углового размера пикселя



$$\frac{\omega}{360^\circ} = \frac{D_{\text{пкс}}}{2\pi R_{\text{пред}}} \Leftrightarrow \omega = 15,83^\circ$$

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

Оценка ожидаемого количества одиночных мюонов регистрируемых телескопом TAIGA-IACT

$$\text{Для } E > E_1 = 12,51 \text{ ГэВ} \Rightarrow \left(\frac{dN_\mu}{dS d\Omega dt} \right)_1 = 5,487 \frac{\text{мюон}}{\text{м}^2 * \text{ср} * \text{с}}$$

$$\text{Для } E > E_2 = 16,68 \text{ ГэВ} \Rightarrow \left(\frac{dN_\mu}{dS d\Omega dt} \right)_2 = 3,551 \frac{\text{мюон}}{\text{м}^2 * \text{ср} * \text{с}}$$

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

$$\frac{dN_\mu}{dt} = 4,610 \frac{\text{мюон}}{\text{м}^2 * \text{с}} (1 - \cos 1,31^\circ) 2\pi^2 R^2 = 0,110 \frac{\text{мюон}}{\text{с}} = 7 \frac{\text{мюон}}{\text{мин}}$$

Грубый способ расчёта радиуса черенковского кольца

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

$$R^2 = \frac{\sum_{k=1}^n m_k ((x_k - x_c)^2 + (y_k - y_c)^2)}{\sum_{k=1}^n m_k}$$

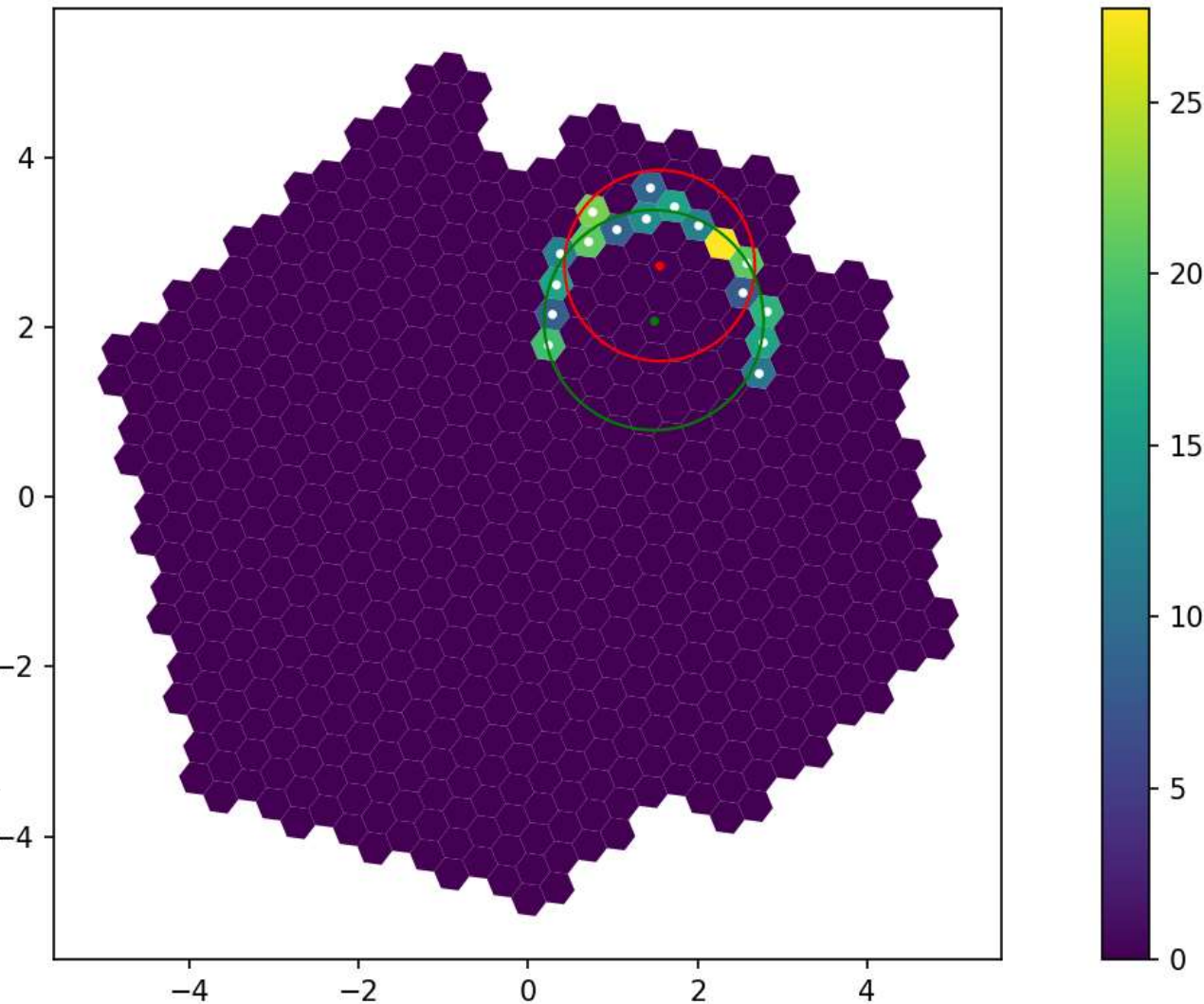
Преобразование Хафа

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

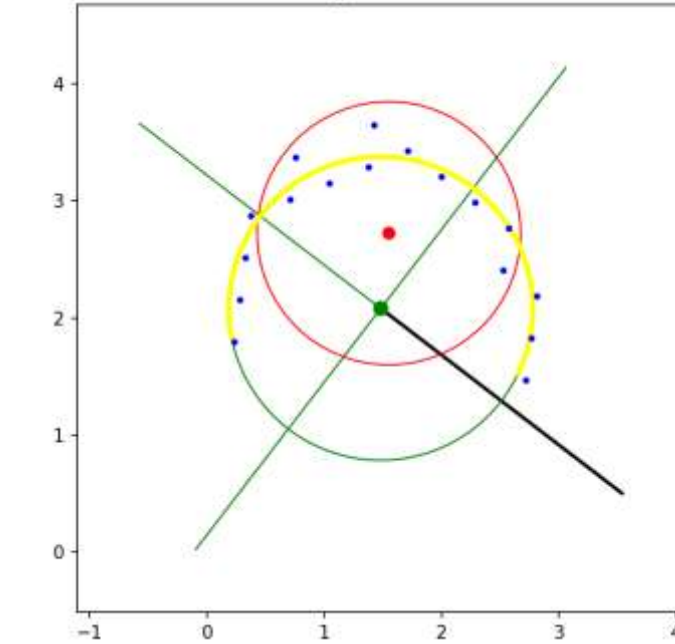
$$x_i = i\Delta x, 0 \leq i \leq d, y_j = j\Delta y, 0 \leq j \leq d$$

$$R_{i,j}^2 = \frac{\sum_{k=1}^n m_k ((x_k - x_i)^2 + (y_k - y_j)^2)}{\sum_{k=1}^n m_k}$$

$$(\Delta R_{i,j})^2 = \frac{\sum_{k=1}^n m_k \left(\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_j)^2} - R_{i,j} \right)^2}{\sum_{k=1}^n m_k}$$



Критерий равномерности черенковского кольца



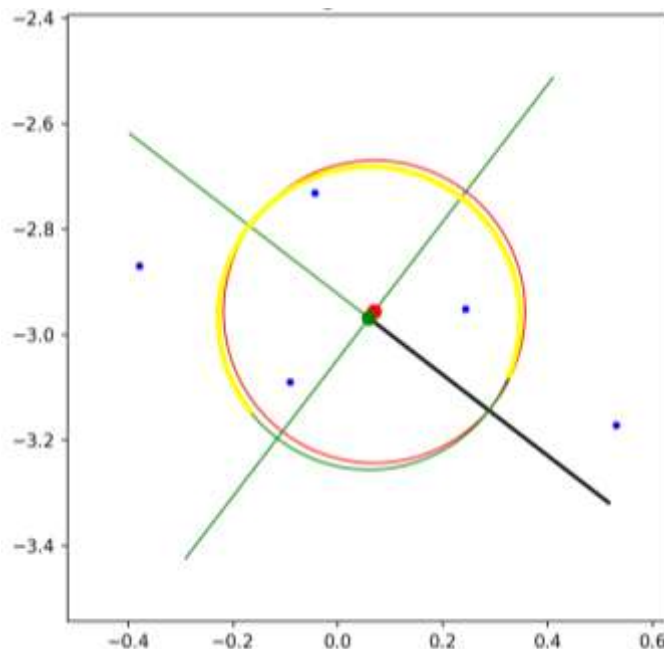
Событие №261:

$$R_{clas} = 9.31 \text{ см}$$

$$R_{haf} = 10.74 \text{ см}$$

$$\Delta R = 0.86 \text{ см}$$

$$\delta = \frac{\Delta R}{R_{haf}} = \frac{0.86 \text{ см}}{10.74 \text{ см}} = 8\%$$



Событие №440:

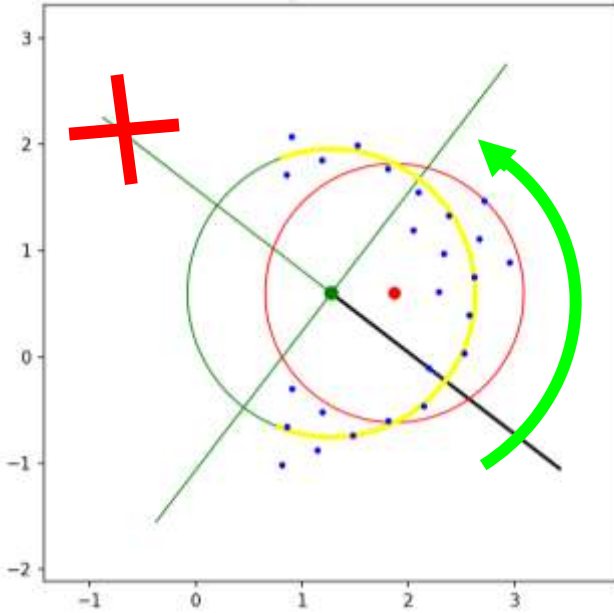
$$R_{clas} = 2.38 \text{ см}$$

$$R_{haf} = 2.38 \text{ см}$$

$$\Delta R = 0.98 \text{ см}$$

$$\delta = \frac{\Delta R}{R_{haf}} = \frac{0.98 \text{ см}}{2.38 \text{ см}} = 41\%$$

Критерий длины дуги черенковского кольца



Событие №37:

$$\theta_{start} = -75^\circ$$

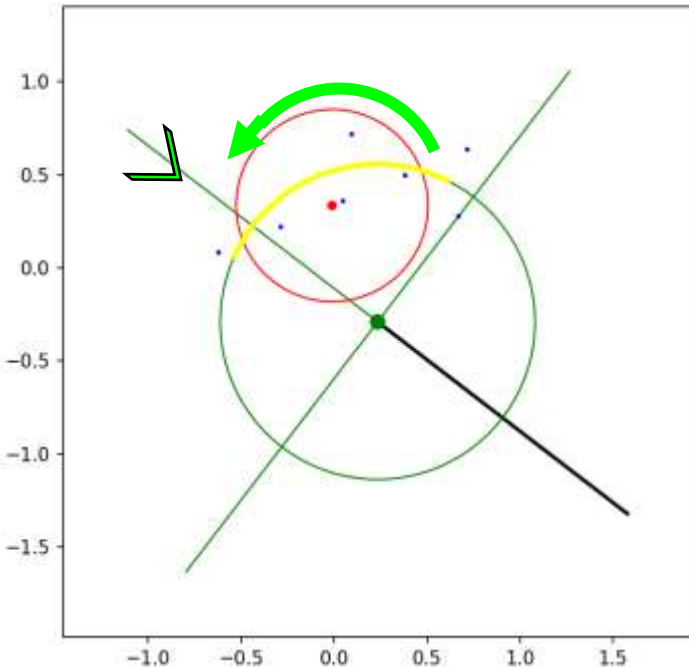
$$\theta_{finish} = 148^\circ$$

дуга **не** проходит через 180°

$$\Delta\theta = 360^\circ - (\theta_{finish} - \theta_{start}) = 360^\circ - (148^\circ - (-75^\circ)) = 137^\circ$$

$$\Delta\theta_{arc} = 360^\circ - \Delta\theta = 360^\circ - 137^\circ = 223^\circ > 180^\circ$$

критерий выполнен



Событие №21:

$$\theta_{start} = 100^\circ$$

$$\theta_{finish} = -166^\circ$$

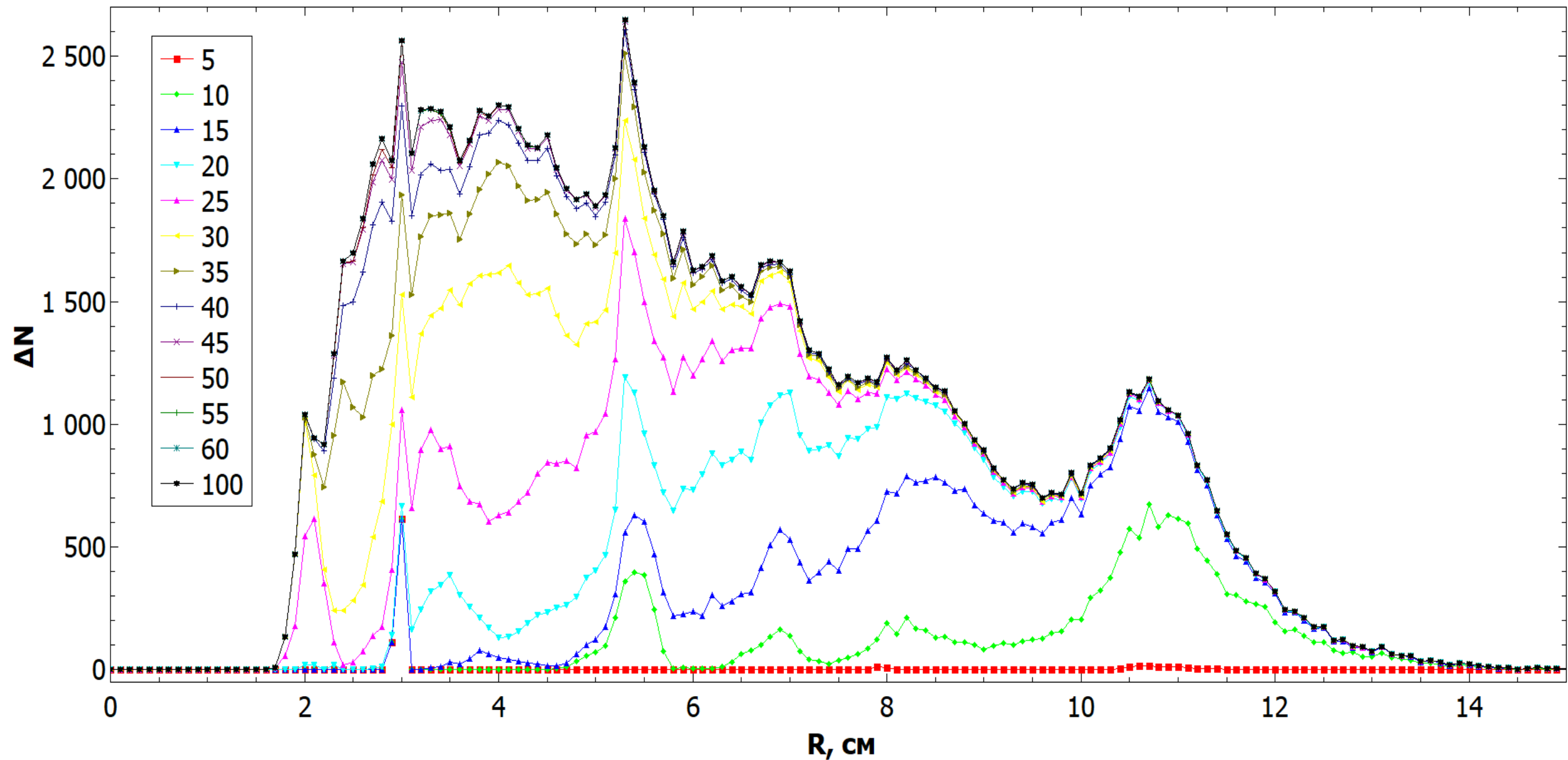
дуга проходит через 180°

$$\Delta\theta = \theta_{start} - \theta_{finish} = 100^\circ - (-166^\circ) = 266^\circ$$

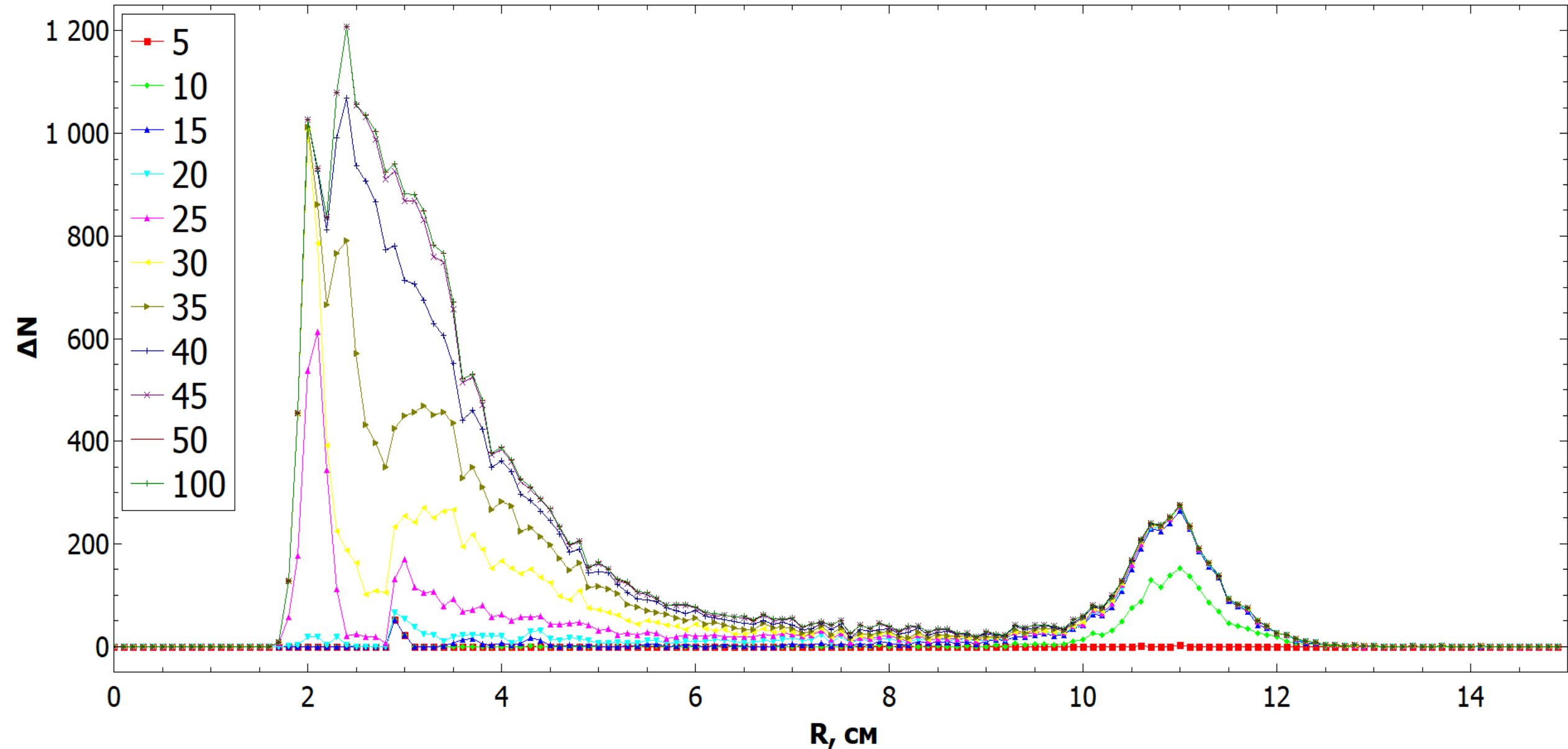
$$\Delta\theta_{arc} = 360^\circ - \Delta\theta = 360^\circ - 266^\circ = 94^\circ < 180^\circ$$

критерий **не** выполнен

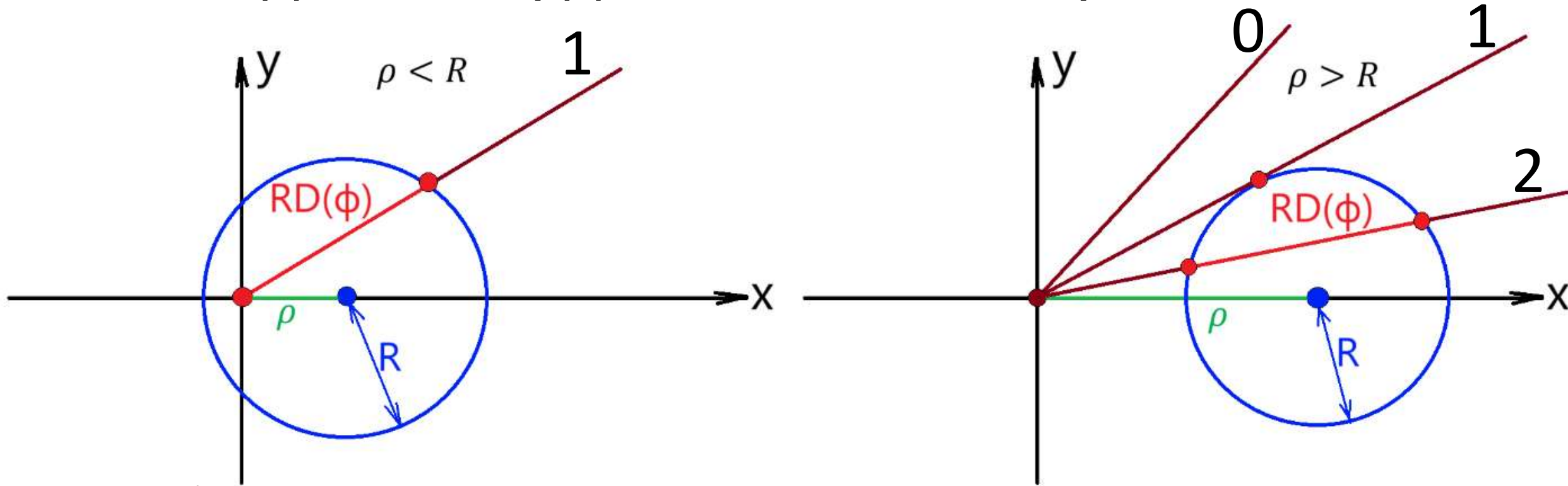
Распределение радиусов черенковских колец без учёта критерия длины дуги кольца



Распределение радиусов черенковских колец с учётом критерия длины дуги кольца



Расчёт длины хорды в плоскости отражателя

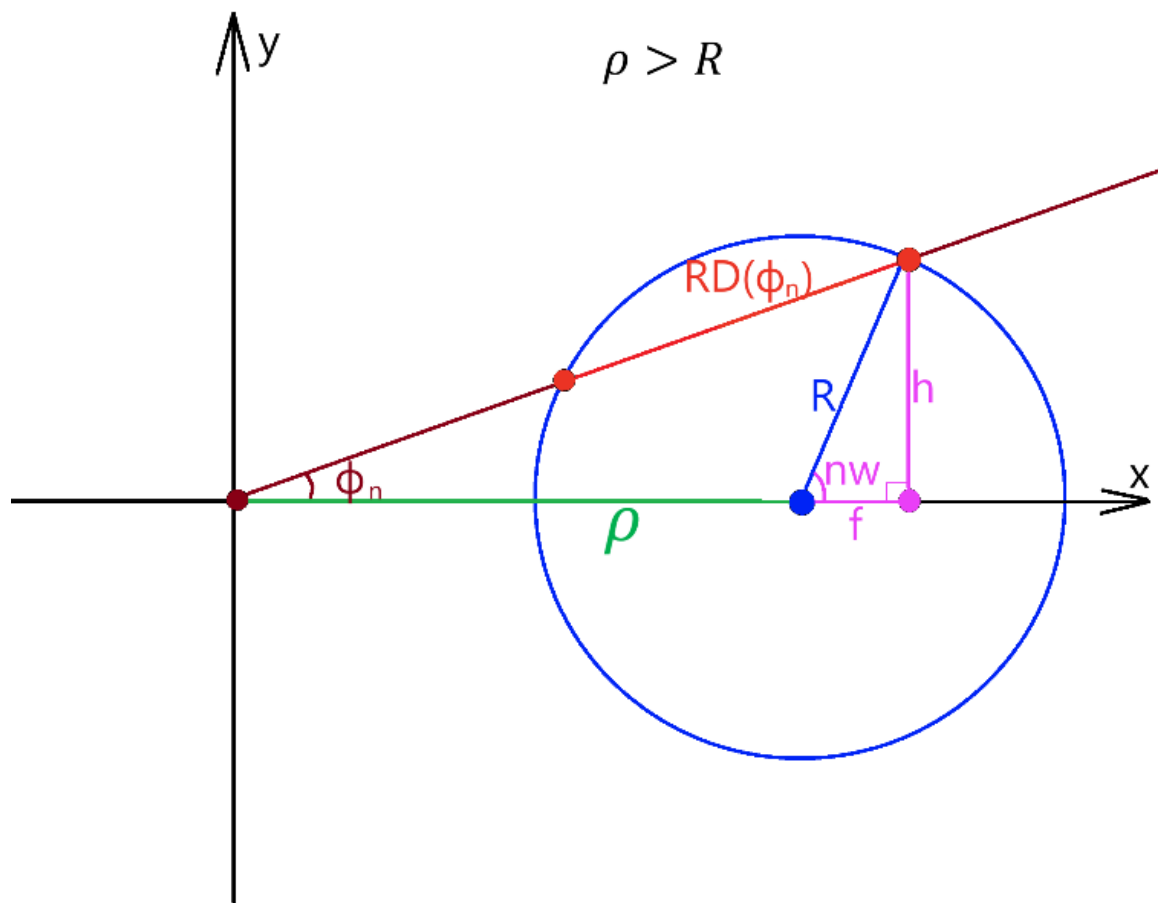


$$D(\varphi) = \begin{cases} \frac{\rho}{R} \cos \varphi + \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{R^2} \sin^2 \varphi}, & \rho < R \\ 2 \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{R^2} \sin^2 \varphi}, & \rho > R \end{cases}$$

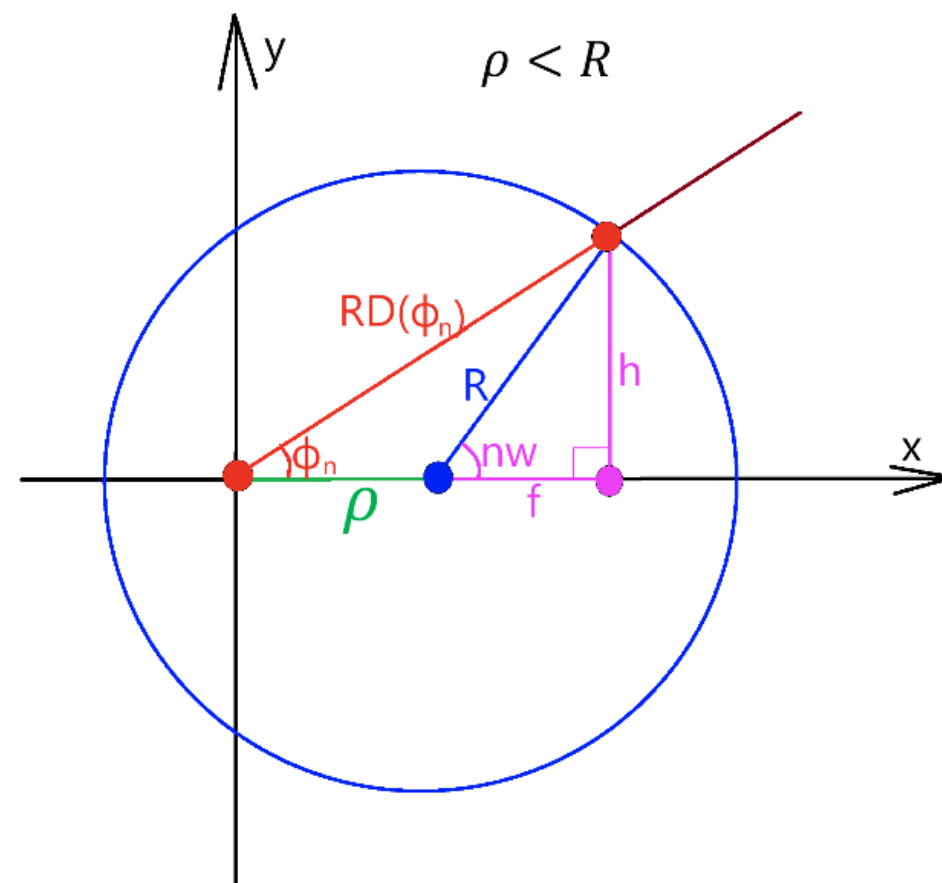
$$\rho = 0 \Rightarrow D(\varphi) = 1$$

$$\begin{cases} 0^\circ < |\varphi| < \arcsin \frac{R}{\rho} < 90^\circ, & \rho > R \\ 0^\circ < |\varphi| < 180^\circ, & \rho < R \end{cases}$$

Расчёт граничных азимутальных углов пикселей

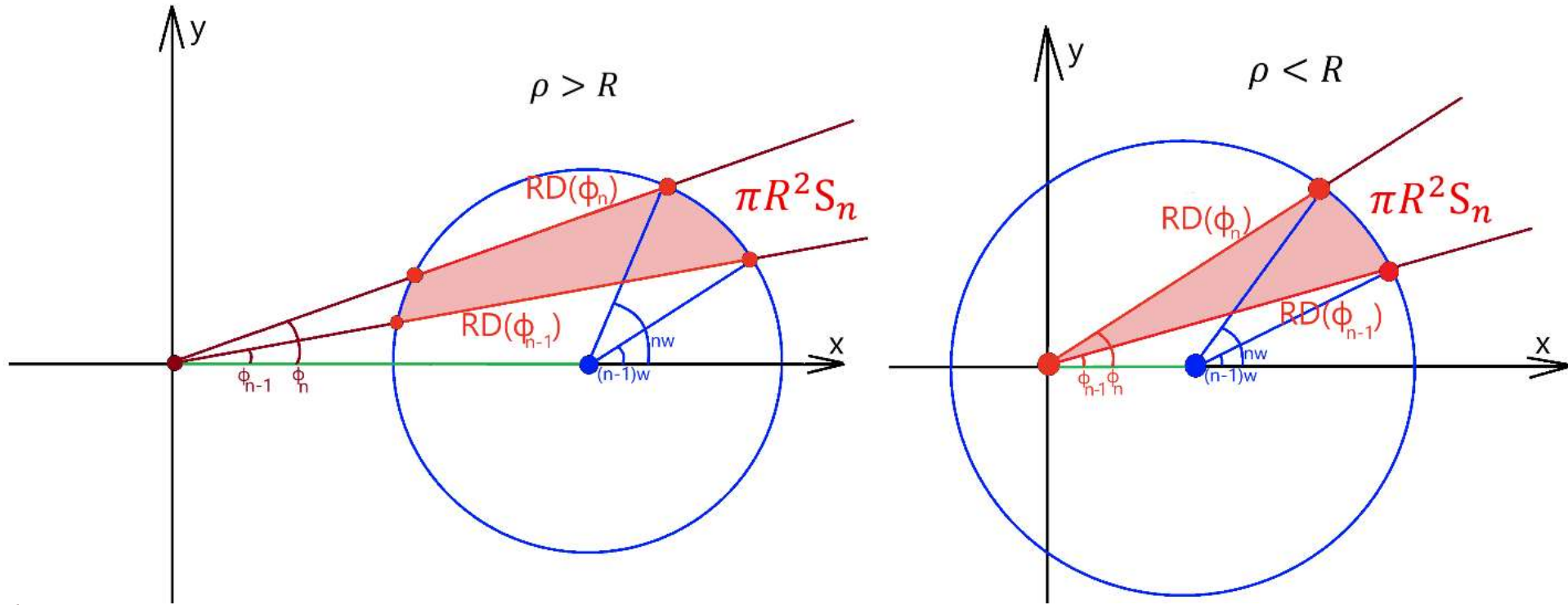


$$\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{h}{\rho + f} = \frac{R \sin(n\omega)}{\rho + R \cos(n\omega)}$$



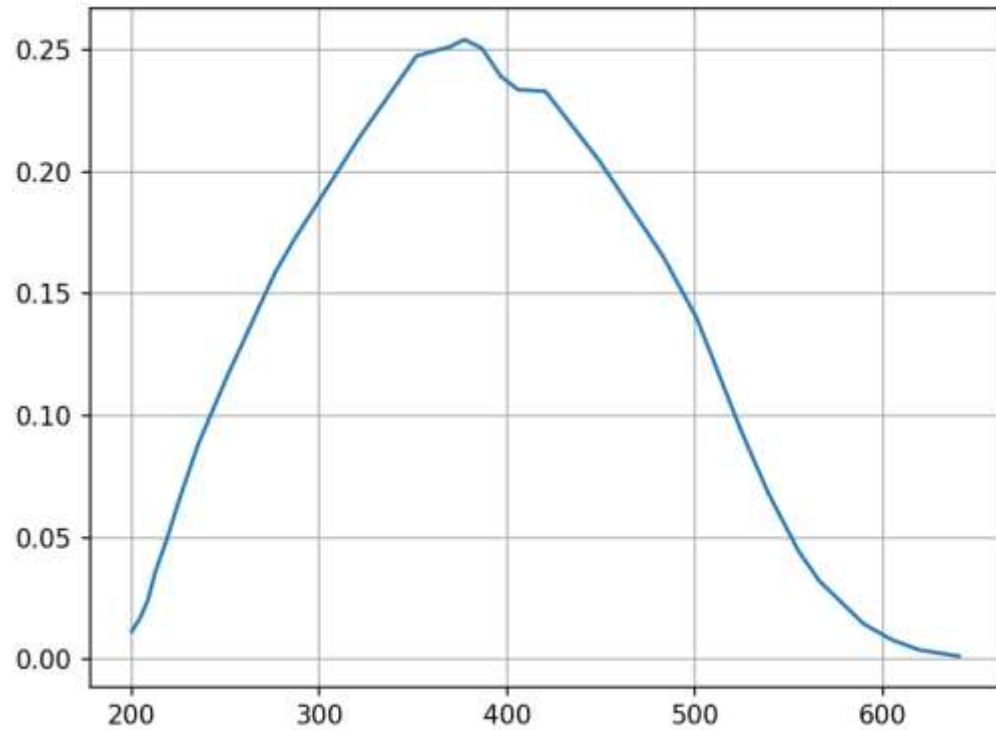
$$\rho = 0 \Rightarrow \varphi_n = n\omega$$

Расчёт площади зоны зеркала, собирающей свет в один пиксель



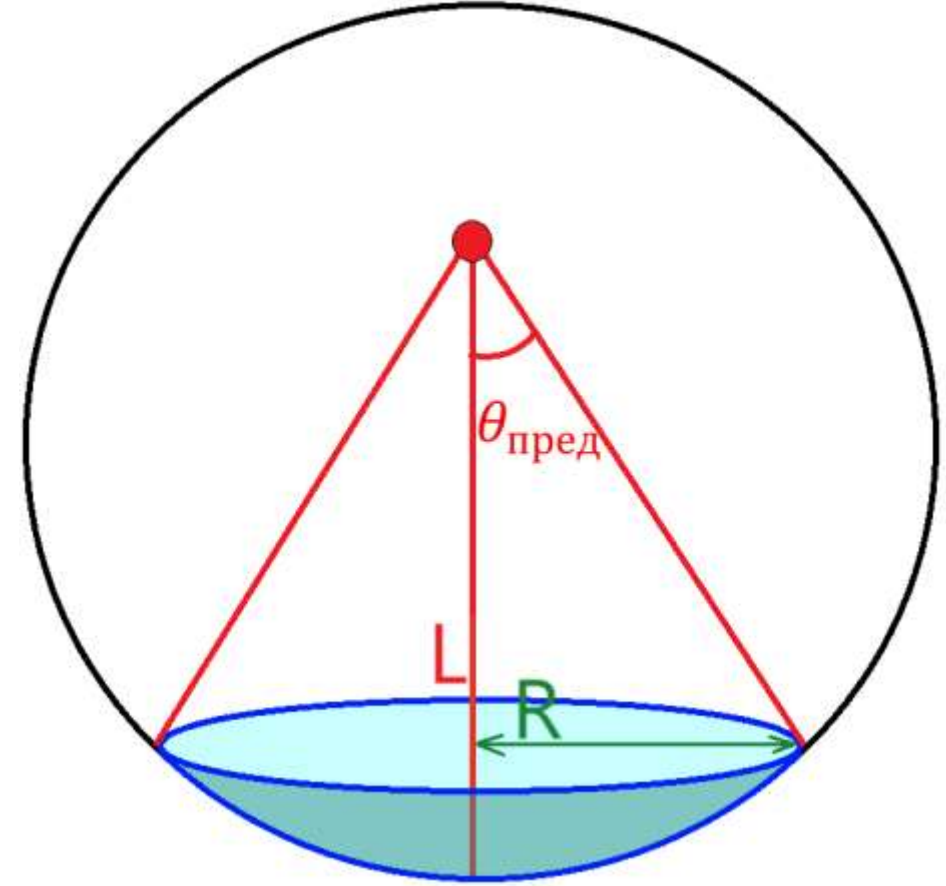
$$S_n = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\rho^2}{2R^2} (\sin 2\varphi_n - \sin 2\varphi_{n-1}) + \varphi_n - \varphi_{n-1} + \arcsin\left(\frac{\rho}{R} \sin \varphi_n\right) - \right. \\ \left. - \arcsin\left(\frac{\rho}{R} \sin \varphi_{n-1}\right) + \frac{\rho}{R} \left(\sin \varphi_n \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{R^2} \sin^2 \varphi_n} - \sin \varphi_{n-1} \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{R^2} \sin^2 \varphi_{n-1}} \right) \right), \rho < R \\ \frac{1}{\pi} \left(\arcsin\left(\frac{\rho}{R} \sin \varphi_n\right) - \arcsin\left(\frac{\rho}{R} \sin \varphi_{n-1}\right) + \right. \\ \left. + \frac{\rho}{R} \left(\sin \varphi_n \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{R^2} \sin^2 \varphi_n} - \sin \varphi_{n-1} \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{R^2} \sin^2 \varphi_{n-1}} \right) \right), \rho > R \end{cases} \quad \rho = 0 \Rightarrow S_n = \frac{\omega}{2\pi}$$

Расчёт плотности распределения фотонов в кольце



$$N = 2\pi\alpha L \sin^2 \theta_{\text{пред}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{\eta(\lambda)}{\lambda^2} d\lambda$$

$$I_n = \pi R \alpha \psi S_n \sin 2\theta_{\text{пред}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{\eta(\lambda)}{\lambda^2} d\lambda$$



$$\psi \sim 34\%$$

$$\rho = 0 \Rightarrow S_n = \frac{\omega}{2\pi} \Rightarrow I_{\text{пиксель}} = 46\psi \sim 16$$

Заключение

В данной работе:

- было оценено ожидаемое количество регистрируемых мюонных колец телескопом в единицу времени - $7 \frac{\text{мюон}}{\text{мин}}$;
- было использовано преобразование Хафа для выделения одиночных мюонов по форме регистрируемых изображений на основе данных моделирования;

$$R = 10,86 \text{ см} \quad \delta R_{\text{мин}} = 13\% \quad \delta R_{\text{мин} \cap} = 3\% \quad \delta = 10\%$$

- было найдено теоретическое распределение интенсивности черенковского излучения по дуге кольца - S_n ;
- была произведена предварительная оценка интегральной квантовой чувствительности телескопа TAIGA-IACT03 по данным моделирования одиночных мюонов.
 $\psi \sim 34\% \quad I \sim 16 \text{ фотонов/пиксель}.$

Распределение радиусов черенковских колец

$\delta_{кр}, \%$	$N_{кр}$	$\frac{N_{кр}}{N}, \%$	$R, \text{см}$	$\delta R, \%$	$(N_{кр})_{дуг}$	$\left(\frac{N_{кр}}{N}\right)_{дуг}, \%$	$R_{дуг}, \text{см}$	$\delta R_{дуг}, \%$
0	0	0	-	-	0	0	-	-
5	887	0,602	4,36967	60	77	0,052	3,23896	70
10	16972	11,523	9,48453	13	1583	1,075	10,5584	3
15	44669	30,326	8,99821	17	3245	2,203	10,3665	5
20	68423	46,453	8,1574	25	4076	2,767	9,45034	13
25	94657	64,264	7,28206	33	7456	5,062	6,60951	39
30	118323	80,331	6,68633	38	11825	8,028	5,42044	50
35	134258	91,15	6,35238	42	17787	12,076	4,72811	56
40	142906	97,021	6,18822	43	23182	15,739	4,40729	59
45	146355	99,362	6,12889	44	25653	17,416	4,33162	60
50	147026	99,818	6,11776	44	25912	17,592	4,33022	60
55	147271	99,984	6,11243	44	25916	17,595	4,3304	60
60	147292	99,999	6,11206	44	25916	17,595	4,3304	60
65	147294	100	6,11202	44	25916	17,595	4,3304	60
70	147294	100	6,11202	44	25916	17,595	4,3304	60
75	147294	100	6,11202	44	25916	17,595	4,3304	60
80	147294	100	6,11202	44	25916	17,595	4,3304	60
85	147294	100	6,11202	44	25916	17,595	4,3304	60
90	147294	100	6,11202	44	25916	17,595	4,3304	60
95	147294	100	6,11202	44	25916	17,595	4,3304	60
100	147294	100	6,11202	44	25916	17,595	4,3304	60
Классика	147294	100	4,3729	60	-	-	-	-