

Кинематическое описание азимутальных корреляций частиц в соударениях адронов и ядер высоких энергий и явление выстроенности в космических лучах

И. П. Лохтин¹⁾, А. В. Никольский^{1,2)}, А. М. Снигирев^{1,2)}

1) НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва Россия;

2) ЛТФ ОИЯИ, Дубна, Россия

Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН

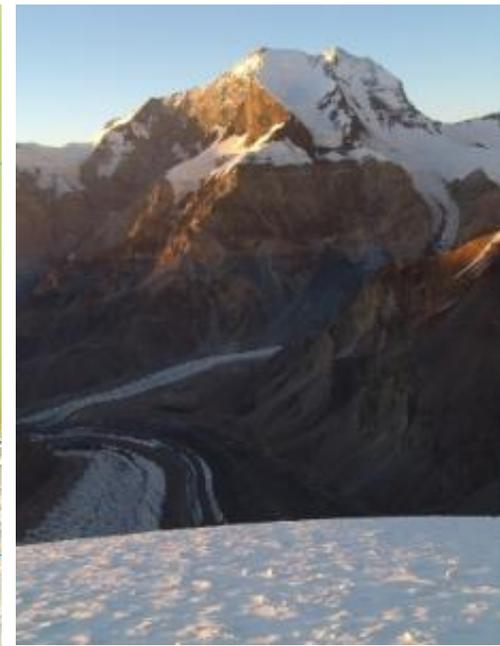
1-5 апреля, 2024



Наша мотивация / эксперимент Памир

Эксперимент «Памир» с космическими лучами

- Горная система Памир расположена между центральной Азией и Пакистаном;
- Использовались рентгеноэмульсионные камеры на высоте 4400 метров (и выше);
- Наблюдаемые события – семейства адронов и фотонов генерируются протонами с энергиями 10^4 ТэВ и выше.

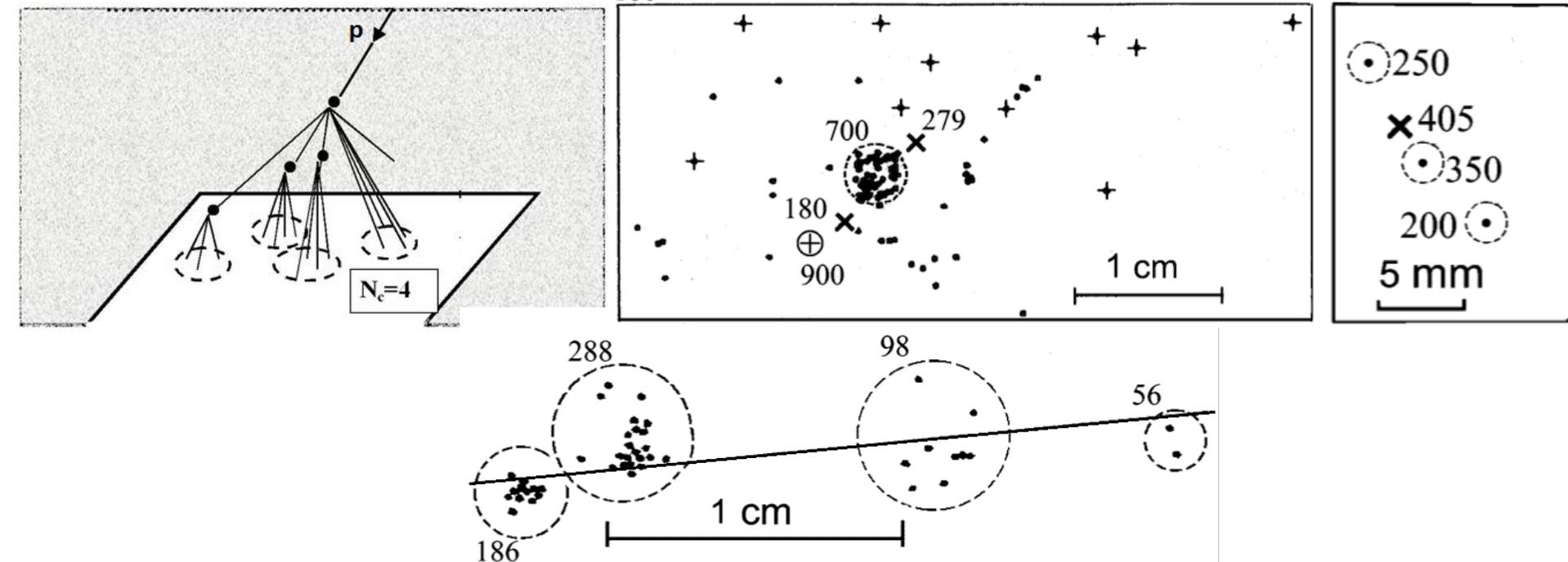


- Коллаборация «Памир» включала 8 стран: Россия, Япония, Польша, Бразилия, Боливия, Грузия, Узбекистан и Таджикистан.

Наша мотивация / эксперимент Памир

Один из главных результатов эксперимента «Памир» – наблюдение явления выстроенности (**alignment**).

Выстроенность характеризует отклонение точек (энергетически выделенных центров) от прямой линии на плоскости эмульсионной пленки.

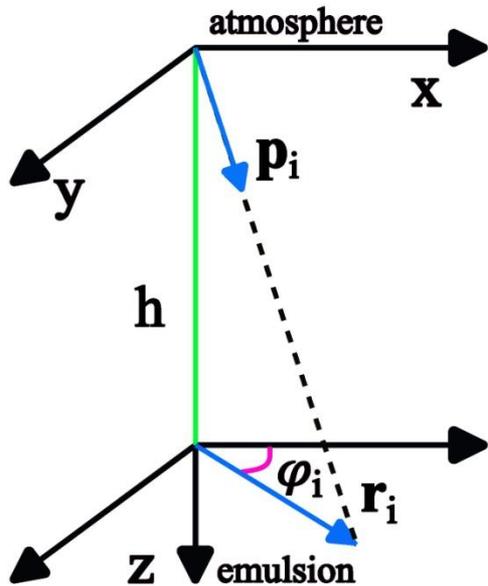


➤ Pamir Collaboration, A. Borisov et al., in Proceedings of 4th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, Beijing, ed. by D. Linkai (1986), p. 4.

➤ Pamir Collaboration, in Proceedings of the 21st International Cosmic Ray Conference, Adelaide, Australia (1989), ed. By R.J. Protheroe (University of Adelaide, Australia, 1990), p. 227.

Кинематика событий

Выстроенность регистрируемых событий проявляется при $\sum E_\gamma > 0.5$ ПэВ, что соответствует энергии столкновений $\sqrt{s} \geq 4$ ТэВ и, следовательно, наличию **порога энергии** у «выстроенных» частиц и их кластеров.



$$\left(\sqrt{p_{Ti}^2 + m_i^2} \cosh \eta_i, p_{Ti} \cos \varphi_i, p_{Ti} \sin \varphi_i, \sqrt{p_{Ti}^2 + m_i^2} \sinh \eta_i \right) \quad (1)$$

$$r_i = \frac{p_{Ti}}{\sqrt{p_{Ti}^2 + m_i^2} \sinh(\eta_0 + \eta_i)} h, \quad r_{min} < r_i < r_{max} \quad (2)$$

$$d_{ij} = \sqrt{r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos(\varphi_i - \varphi_j)}, \quad d_{ij} > r_{min} \quad (3)$$

$$r_{ij} = (r_i E_i + r_j E_j) / (E_i + E_j). \quad (4)$$

Среди частиц (кластеров), которые удовлетворяют (2), (3) отбираются $N = 2, \dots, 7$ наиболее энергичных, для которых вычисляется выстроенность λ_N , используя определение введенное А. Борисовым*:

$$\lambda_N = \sum_{i \neq j \neq k}^N \frac{\cos(2\varphi_{ijk})}{N(N-1)(N-2)}. \quad (5)$$

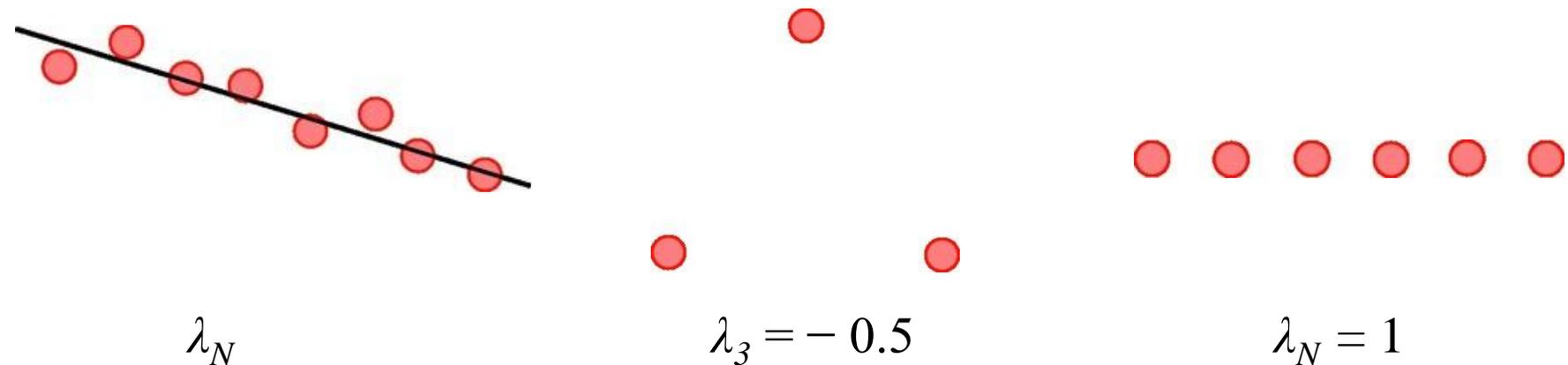
* Pamir Collaboration, L.T. Baradzei et al., Izv. Akad. Nauk, SSSR Ser. Fiz. 50, 2125 (1986)

Определение выстроенности

$$\lambda_N = \sum_{i \neq j \neq k}^N \frac{\cos(2\varphi_{ijk})}{N(N-1)(N-2)}, \quad (5)$$

где φ_{ijk} - угол между векторами $(\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_j)$ и $(\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_i)$, для центрального события $\mathbf{r} = 0$.

Выстроенность – безразмерный параметр, который изменяется в пределах от $-1/(N-1)$ до 1 и характеризует расположение N точек вдоль прямой линии.

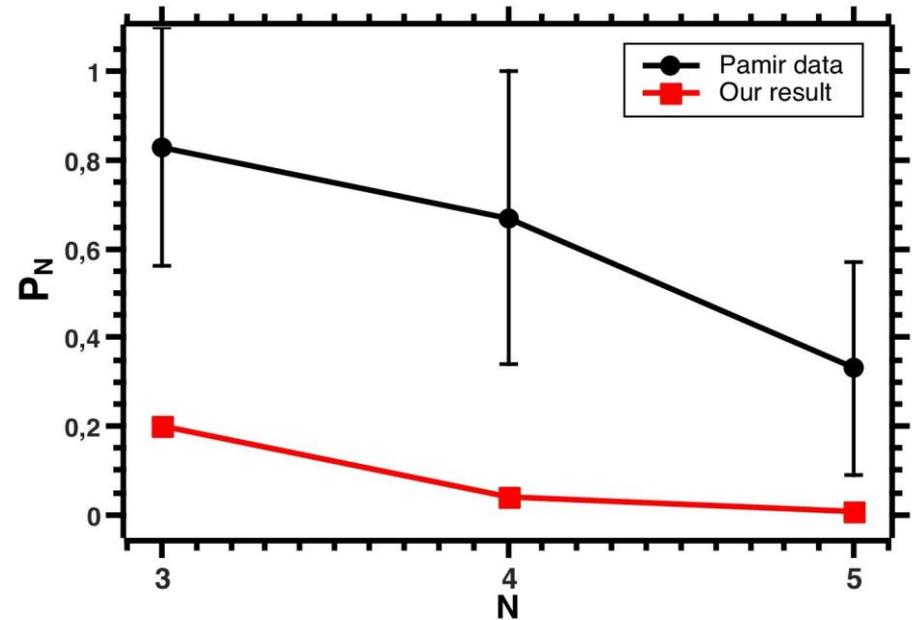
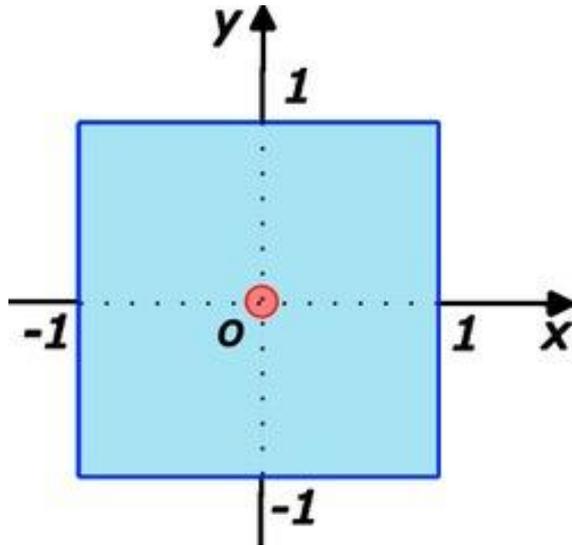


Степень выстроенности – доля от общего числа событий, для которых $\lambda_N > 0.8$ с числом энергетических центров в этих событиях не меньше N .

Наша модель

Модель основана на классическом методе Монте-Карло

- Случайным образом генерируются координаты 2-,3-,4-х событий на плоскости (x, y) в квадрате с центром в начале координат;
- Координаты каждого события находятся в диапазоне $x=[-1;1]$, $y=[-1;1]$. Центральная точка $O(0; 0)$ всегда зафиксирована;
- Рассчитывается выстроенность (степень выстроенности) для 2-,3-,4-х точек (2, 3, 4 случайные точки + центр O).

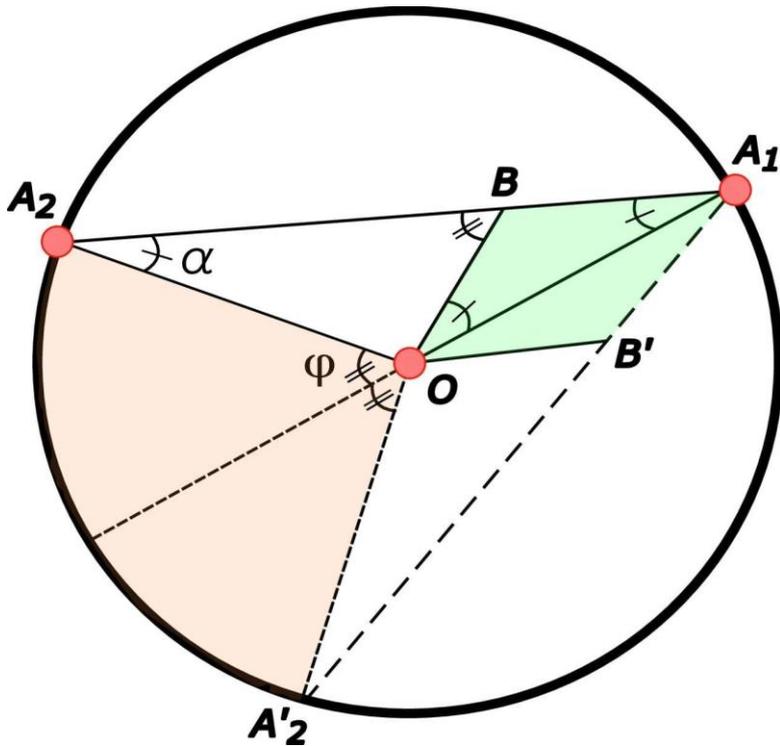


Число сгенерированных событий $N_{\text{total}}=10^7$.

Степень выстроенности $P_N = N [\lambda_N > 0.8] / N_{\text{total}}$.

Наша модель

Степень выстроенности трех точек (две случайно ориентированные A_1 , A_2 и центральная точка O в начале координат) может быть оценена из геометрических соотношений.



При малом угле α выстроенность трех точек OA_1A_2 и OA_1B :

$$\lambda(OA_1A_2) = \lambda(OA_1B) \simeq 1 - 4\alpha^2. \quad (6)$$

Минимальное значение выстроенности:

$$\lambda_0 = 1 - \frac{16\alpha^2}{3}. \quad (7)$$

Минимальное значение степени выстроенности:

$$P_3^{\min}(\lambda_0) \simeq \frac{5\alpha}{2\pi} = \frac{5\sqrt{3}}{2} \frac{\sqrt{1-\lambda_0}}{4\pi}. \quad (8)$$

При $\lambda_0 = 0.8$ получим $P_3^{\min}(\lambda_0) \simeq 0.16$, что **близко** к значению моделирования $P_3 = 0.2$. Также соотношение $P_N = P_3^{N-2}$ хорошо согласуется с результатами нашего моделирования.

Дополнение к модели

Продemonстрируем как дополнительные кинематические ограничения, имитирующие в некотором роде условия эксперимента «Памир», влияют на степень выстроенности.

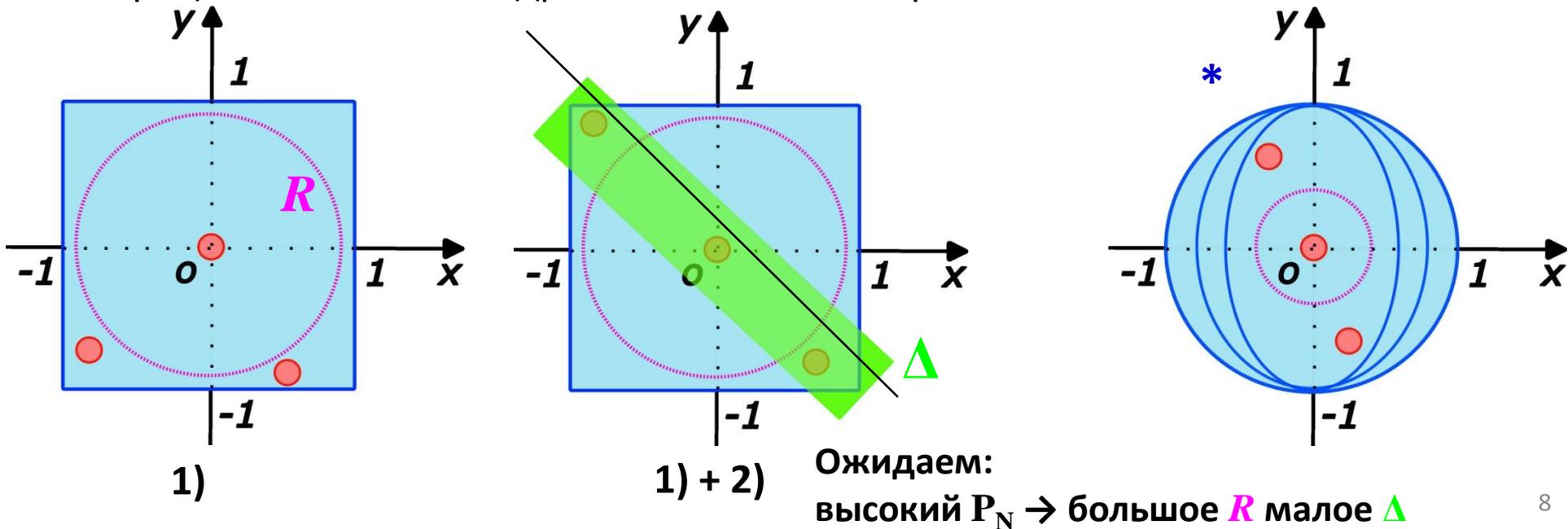
1) **Энергетический порог R** у детектируемых частиц ($\sum E_\gamma > 0.5$ ПэВ в эксп.)

$$|\mathbf{r}_1| + |\mathbf{r}_2| + \dots + |\mathbf{r}_{N-1}| > (N-1) R.$$

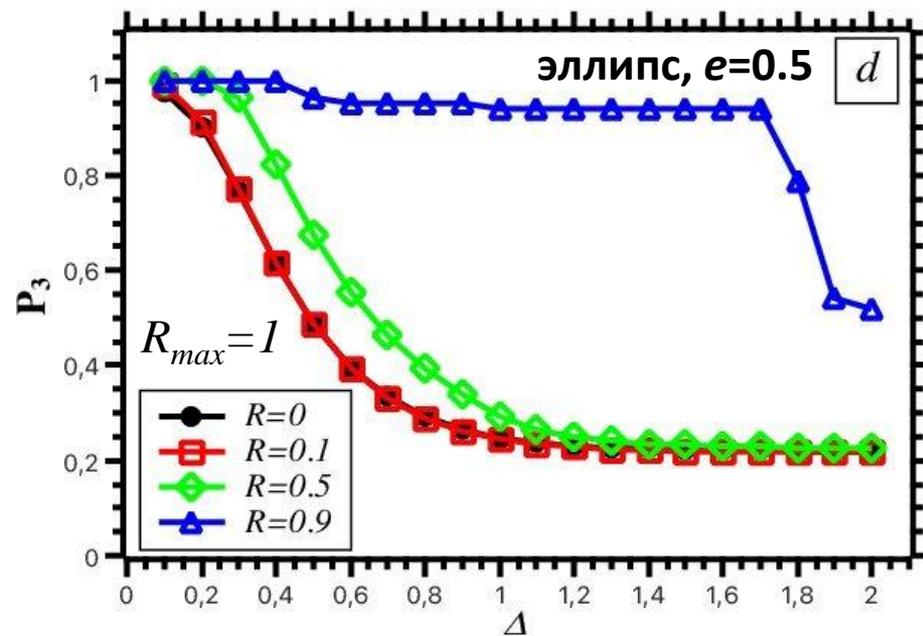
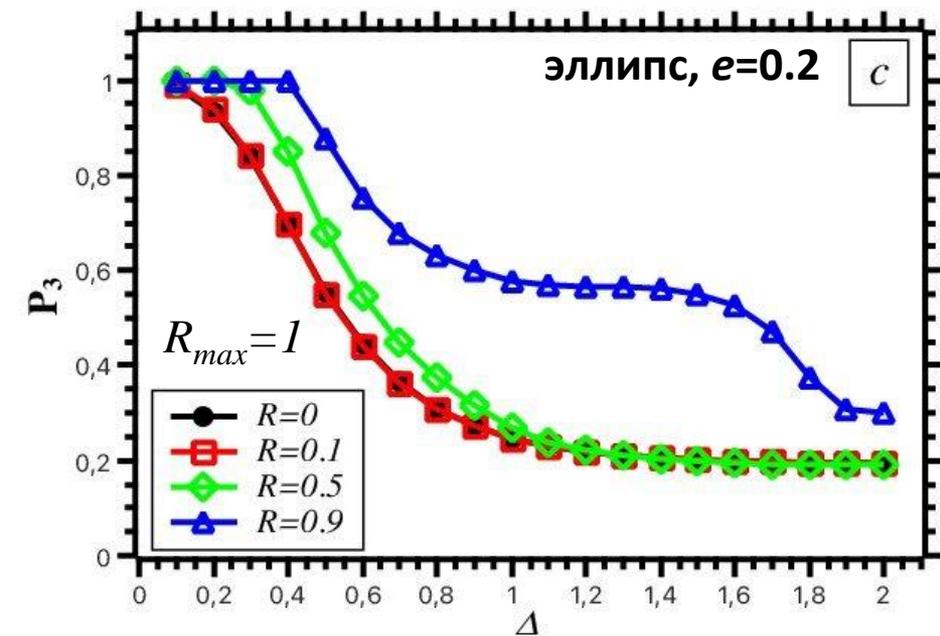
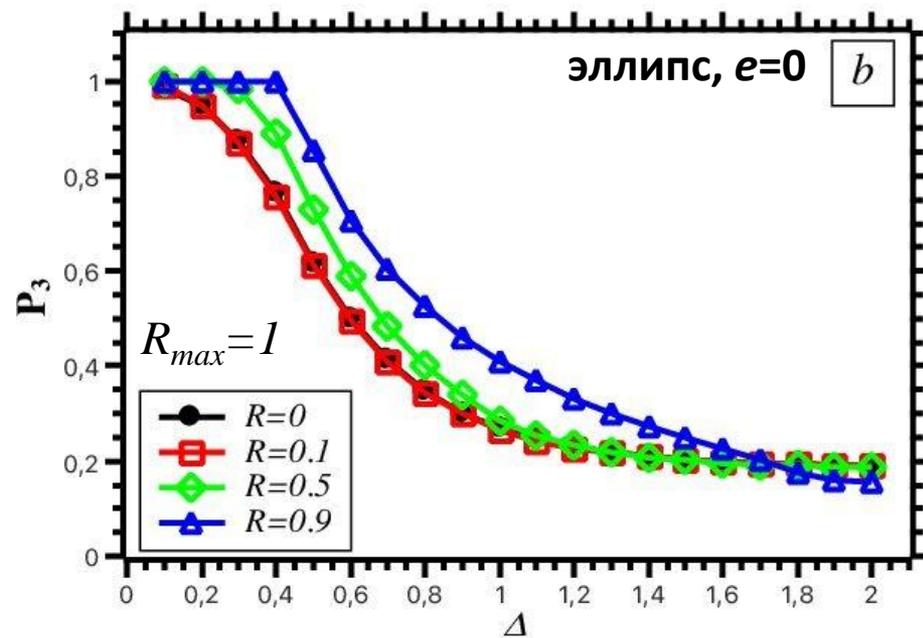
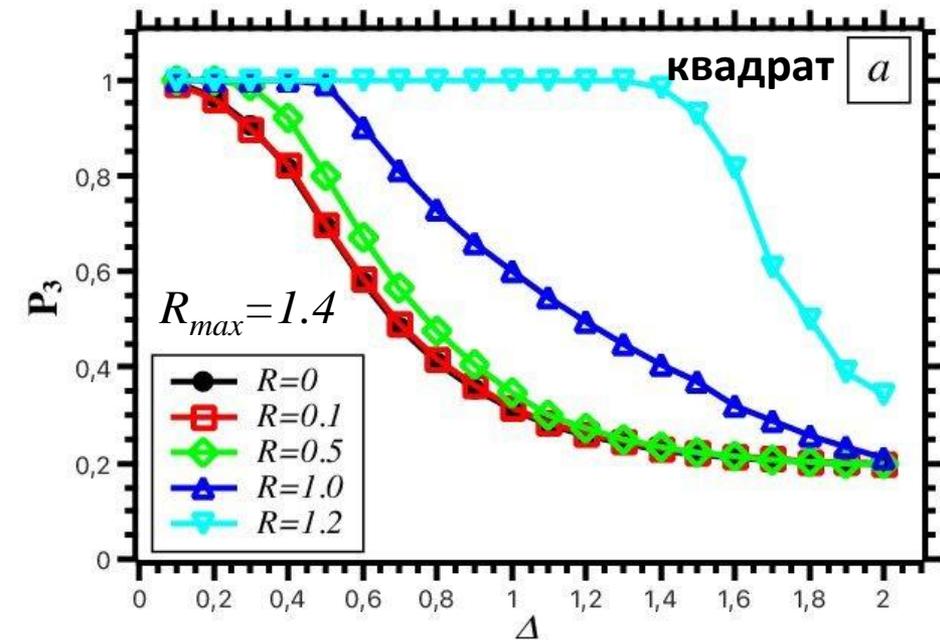
2) **Баланс поперечного импульса Δ** у детектируемых частиц

$$|\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 + \dots + \mathbf{r}_{N-1}| < \Delta.$$

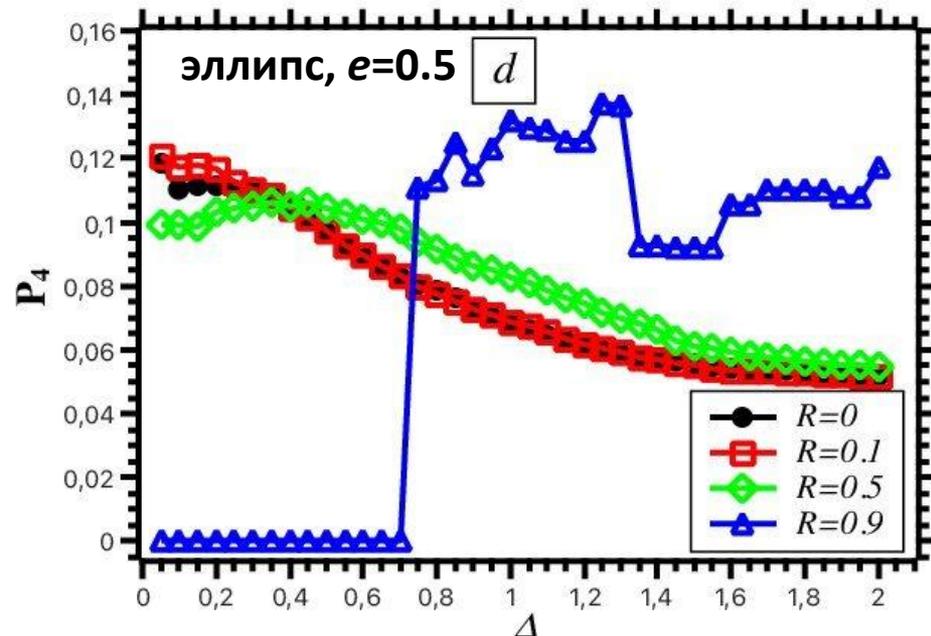
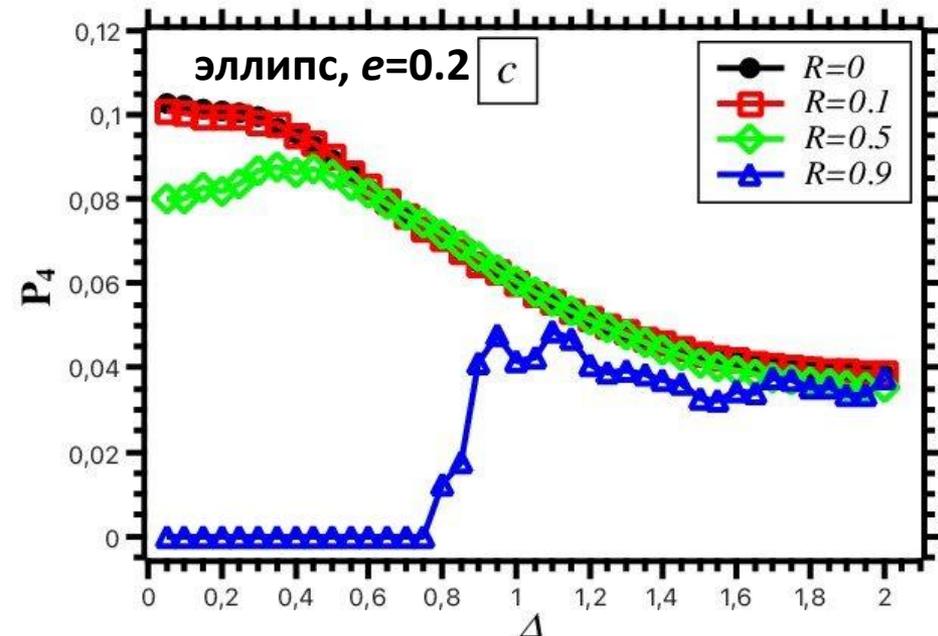
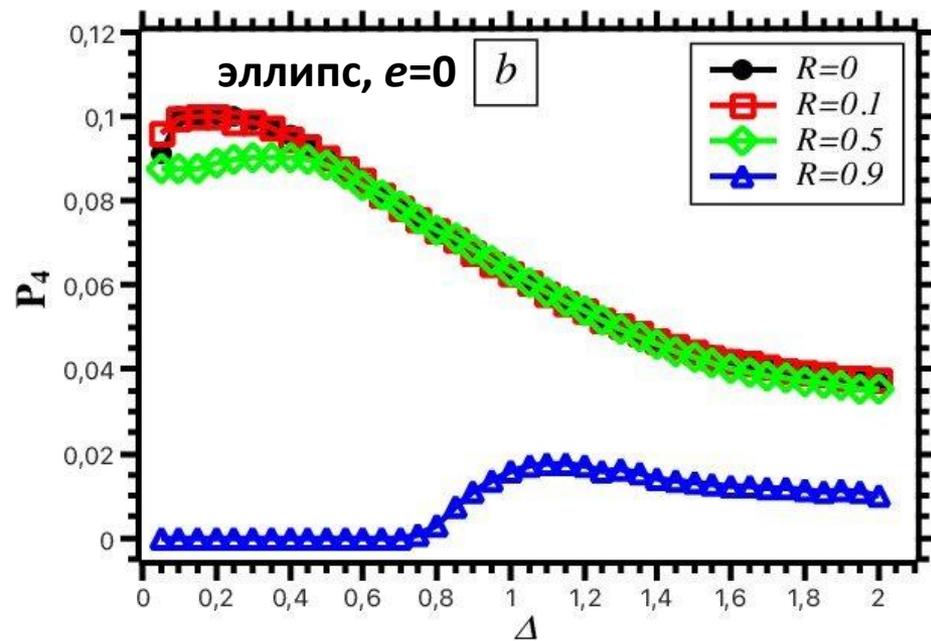
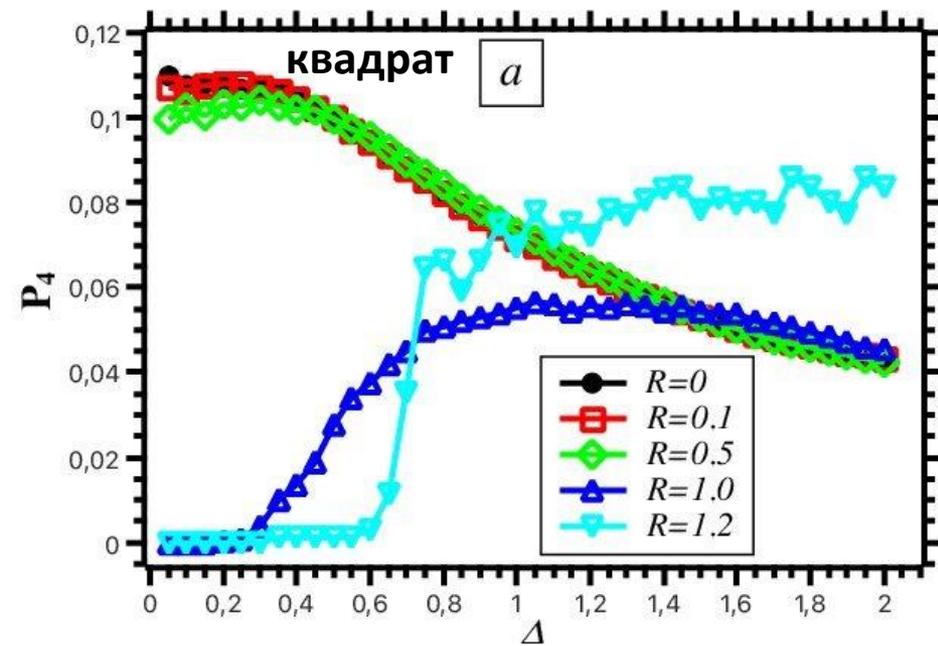
* Генерация событий в квадрате \rightarrow в эллипсе с различным e



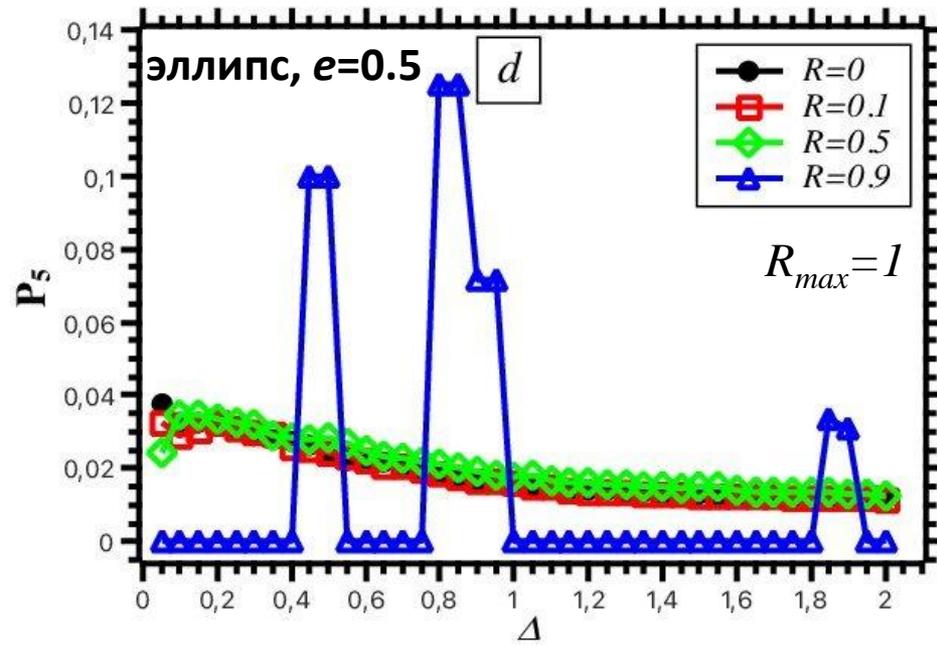
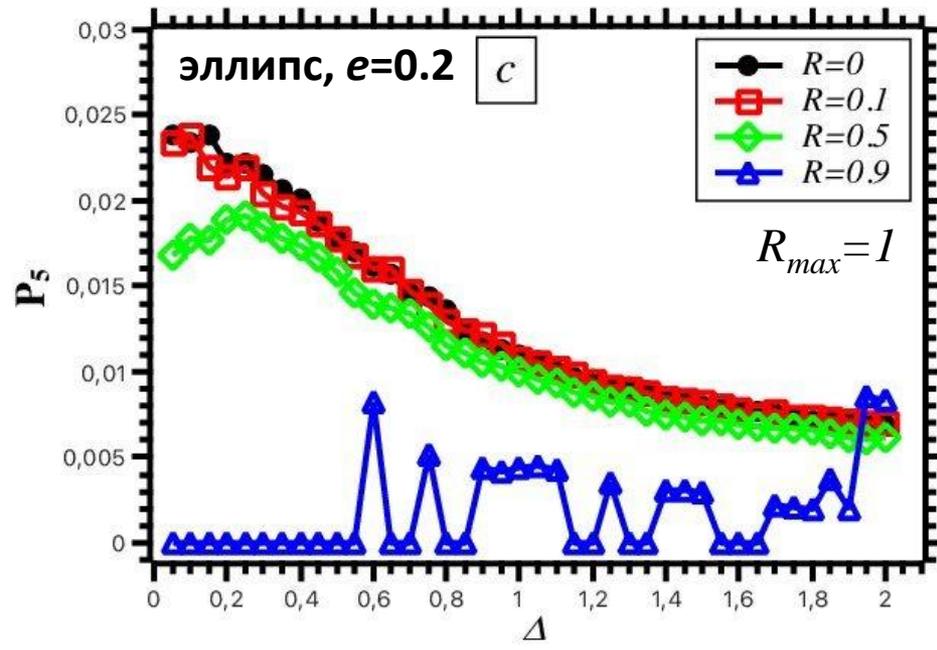
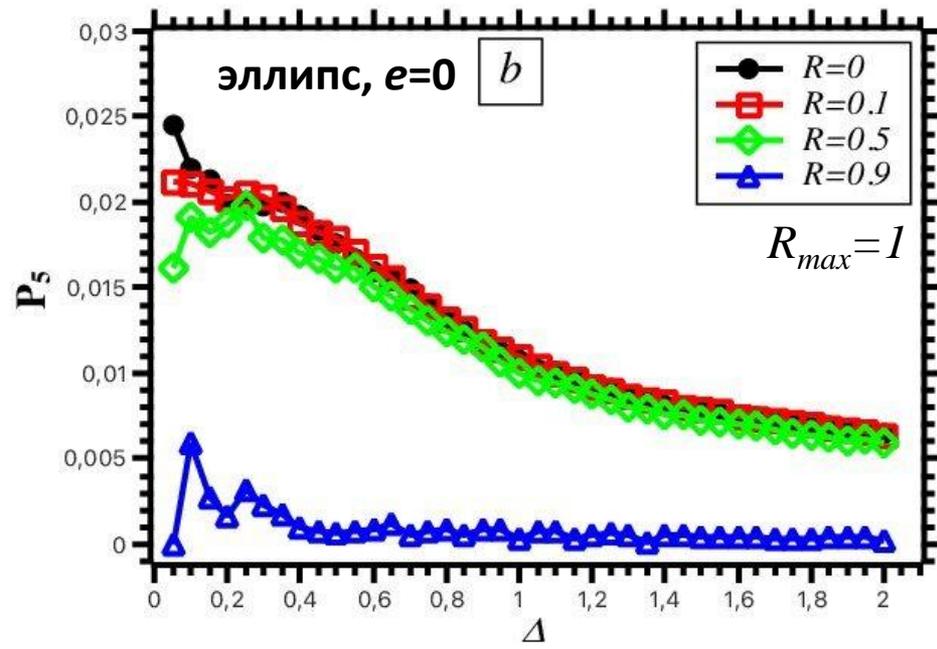
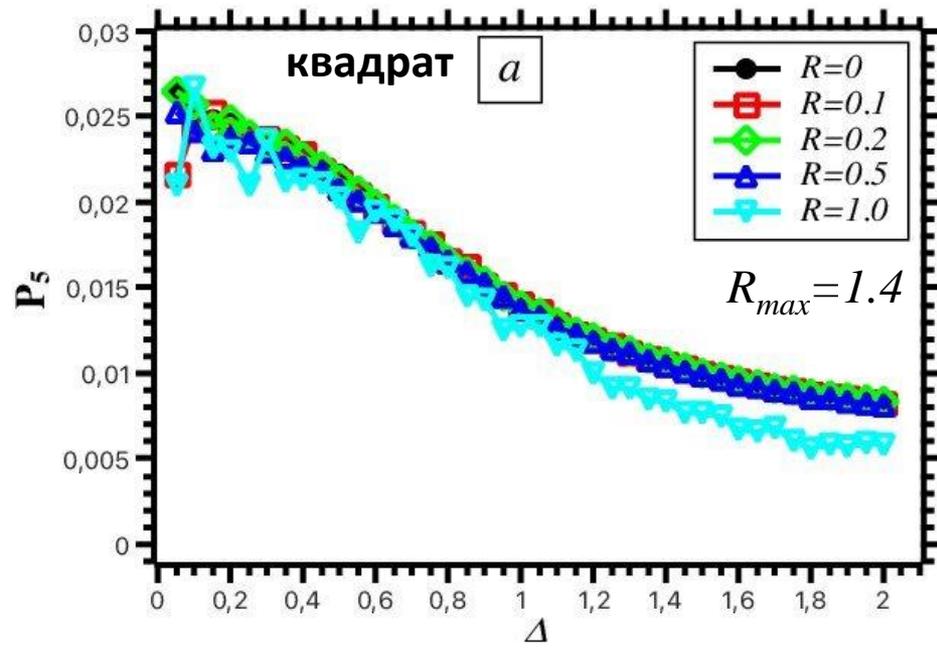
Результаты для трех точек. $P_3(\Delta)$



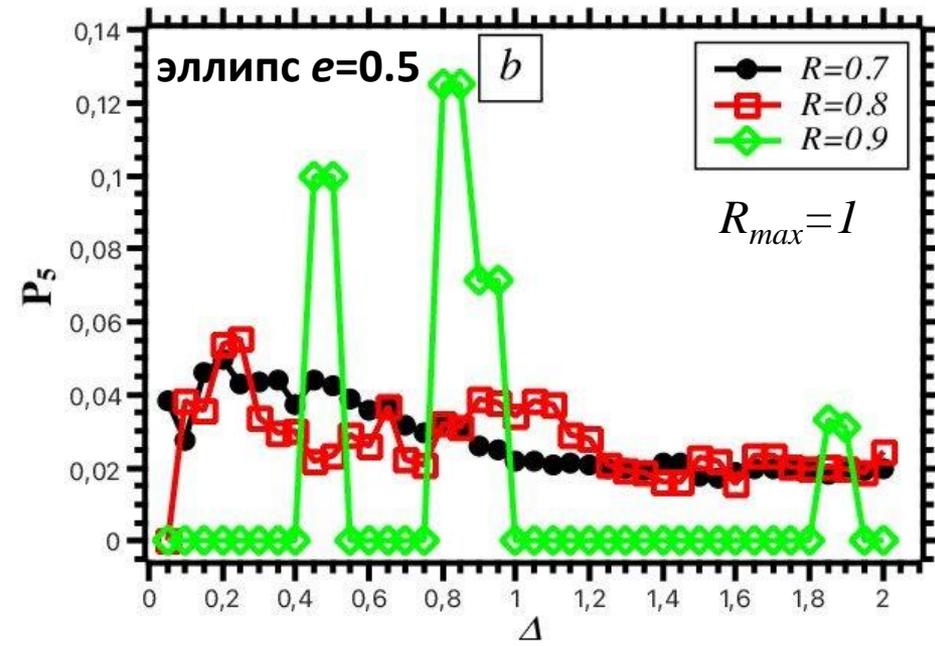
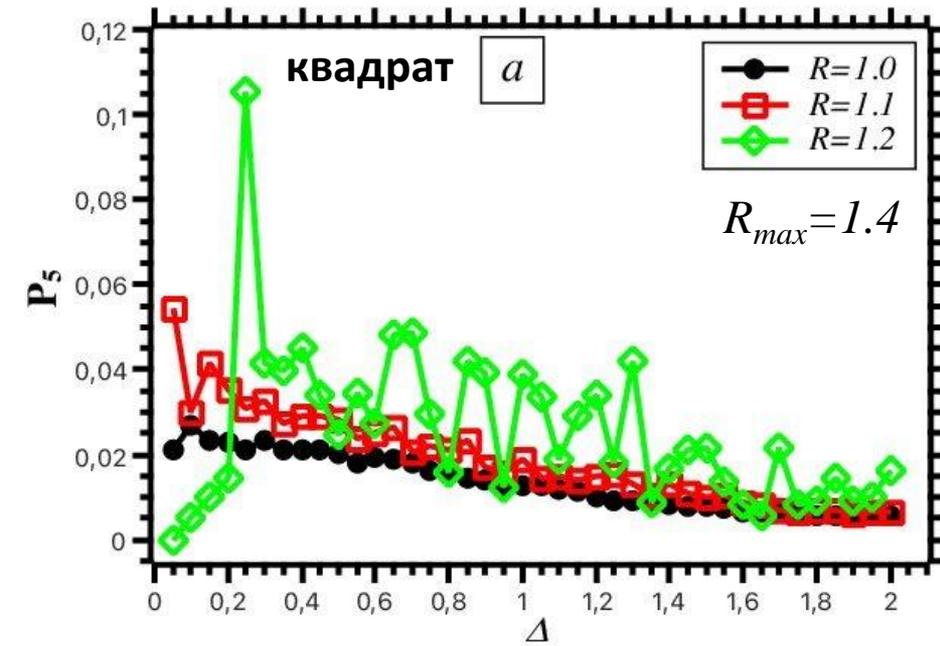
Результаты для четырех точек. $P_4(\Delta)$



Результаты для пяти точек. $P_5(\Delta)$



Результаты для пяти точек. Флуктуации $P_5(\Delta)$

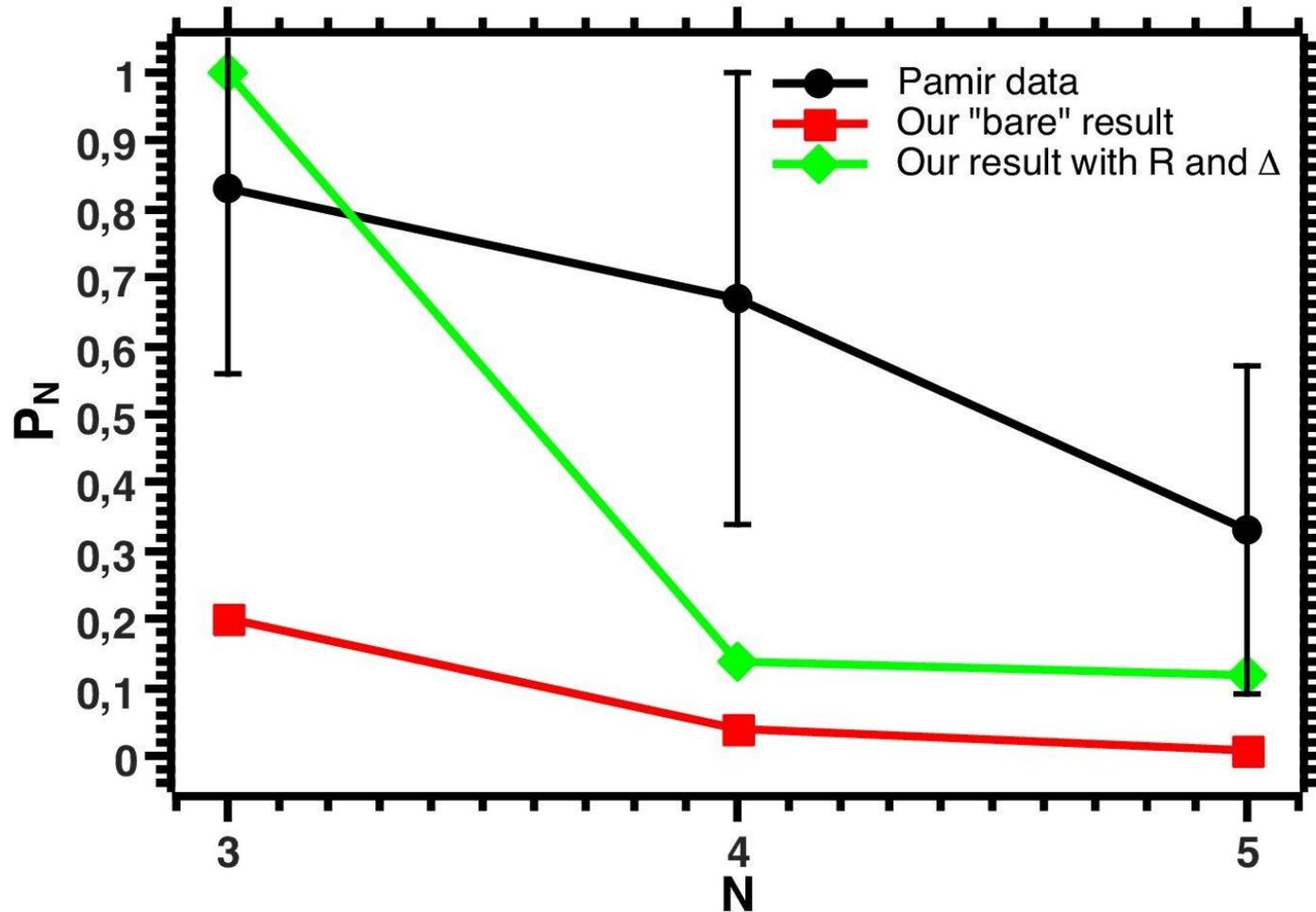


Энергетический порог R имеет **азимутальную симметрию** (круг), а область генерации событий **отличный тип симметрии** (эллипс и квадрат).

Степень выстроенности P_N чувствительна к форме области генерации при R близком к R_{max} .

«Граничный» эффект приводит к **флуктуациям** P_N , которые особенно выражены для пяти точек.

Сравнение результатов с данными Памир



Степень выстроенности P_N для трех, четырех, пяти точек.

□ HYDJET++ (HYDrodynamics+JETs)* – Монте-Карло генератор событий, релятивистских столкновений тяжелых ионов, учитывающий суперпозицию мягкой гидродинамической и жесткой струйной компонент ядерной реакции;

- Вычисление доли выстроенных событий, P_N , для 3, 4, 5 наиболее энергичных частиц и их кластеров; $P_N = P_3^{N-2}$?
- Получение зависимости P_N от дисбаланса $\Delta\mathbf{P}_T$ поперечного импульса частиц, $P_N(\Delta\mathbf{P}_T)$;
- Анализ влияния анизотропного потока частиц и рождения струй на P_N .

* *I.P. Lokhtin et al.. Comp. Phys. Commun. 180 (2009) 779*

Выводы

- Разработана геометрическая модель явления выстроенности, которое наблюдалось коллаборацией Памир;
- Модель демонстрирует, что высокая степень выстроенности может быть следствием процедуры отбора наиболее энергичных частиц – порога энергии (R) совместно с законом сохранения поперечного импульса;
- Влияние закона сохранения поперечного импульса отражается в «балансе» полного радиус-вектора (Δ).
- Для трех частиц – получена 100% выстроенность в широком диапазоне баланса поперечного импульса регистрируемых частиц;
- Для четырех и пяти частиц – модели недостаточно для описания центральных значений степени выстроенности в эксперименте Памир;
- Результаты моделирования не зависят от абсолютного размера области наблюдения частиц, но чувствительны к его форме и границе, что приводит к флуктуациям, особенно для пяти частиц.

Перспективы исследования

- Анализ механизмов азимутальной выстроенности частиц с помощью модели ядро-ядерных взаимодействий HYDJET++.

Спасибо за внимание !