

Поиски структурного излучения и аксиальной аномалии в распаде $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$

*Алексей Кулик, ИЯИ РАН
от имени сотрудничества ОКА*

*А. В. Артамонов^a, В. Н. Бычков^b, А. М. Горин^a, Е. М. Гуцин^c, С. В. Донсков^a,
Б. Ж. Залиханов^b, А. В. Инякин^a, Г. Д. Кекелидзе^b, В. Н. Колосов^a,
А. К. Коноплянников^a, В. И. Кравцов^c, Ю. Г. Куденко^{c,d,e}, А. В. Кулик^c,
В. Ф. Куршеев^a, В. А. Лишин^a, В. М. Лысан^b, М. В. Медынский^a, А. В. Охотников^{a*},
В. Ф. Образцов^a, В. А. Поляков^b, В. И. Рыкалин^a, А. С. Садовский^a, В. Д. Самойленко^a,
С. Р. Слабоспицкий^a, И. С. Тюрин^a, В. А. Уваров^a, А. П. Филин^a, С. Н. Филиппов^c,
Г. В. Хаустов^a, С. А. Холоденко^f, А. А. Худяков^c, М. М. Шапкин^a, О. П. Ющенко^a*

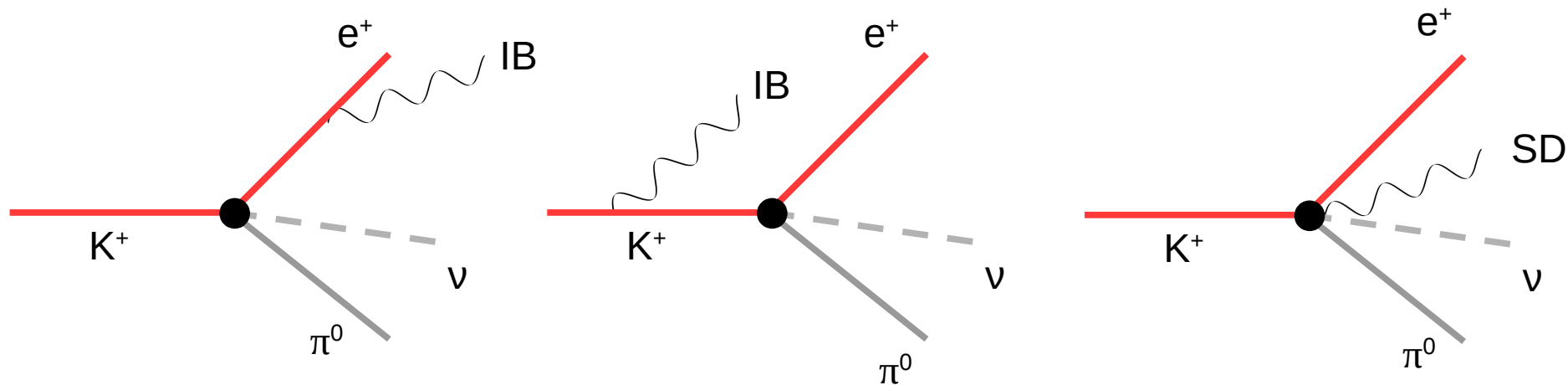
^a НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 142280, Протвино, Россия

^b Объединенный Институт Ядерных Исследований, 141980, Дубна, Россия

^c Институт Ядерных Исследований Российской Академии Наук, 117312, Москва, Россия

^d Московский физико-технический институт, 117303, Москва, Россия

Радиационный распад = Internal Bremsstrahlung (IB) + Structure Dependent (SD)



Новая физика может быть только в структурной компоненте SD
Она очень мала: SD \sim 1% BR

Рассчитывается *Chiral Perturbation Theory ChPT*

J. Bijnens, G. Ecker, J. Gasser. The DAΦNE Physics Handbook 26 Nov 1992, pp.145-183}

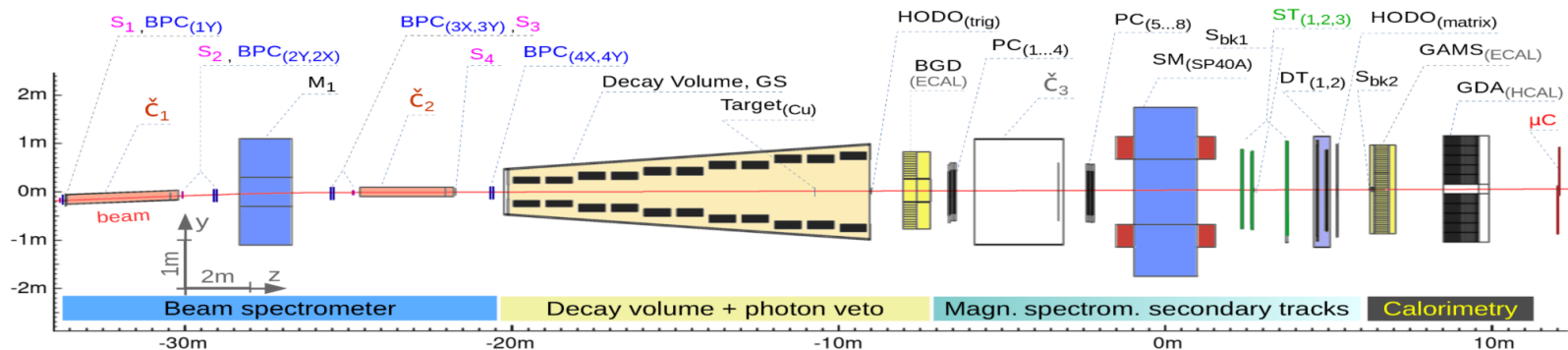
Ограничение на распад $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$
Мы можем заметно улучшить

$BR_{SD} < 5.3 \times 10^{-5}$ (PDG)
Ожидается $\sim 3 \times 10^{-6}$

$BR_{SD} < 5.3 \times 10^{-5}$ получено из 1-мерного распределения ~ 200 событий распада

В.Н. Болотов и др. ЯФ 44 (1986), стр.108-116

Мы имеем в 15 раз больше



1. **Beam spectrometer:** 1mm pitch BPC ~1500 channels; Sc and C counters
2. **Decay volume with Veto system:**
L=11m; Veto: 670 Lead-Scintillator sandwiches 20* (5mm Sc+1.5 mmPb), WLS readout
3. **PC's, ST's and DT's for magnetic spectrometer:**
~5000 ch. PC (2 mm pitch) + 1300 DT (1 and 3 cm)
4. **Pad(Matrix) Hodoscope** ~300 ch. WLS+SiPM readout
5. **Magnet:** aperture 200*140 cm²
6. **Gamma detectors:** GAMS2000, BGD EM cal. ~ 4000 LG.
7. **Muon identification:** GDA-100 HCAL + 4 muon counters (μC) behind
8. **For some runs Cu target inside decay volume was used:** Ø=8 cm, t=2mm and C3 big Cerenkov counter

The main triggers

Prescaled triggers

$$S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \overline{C_1} \cdot C_2 \cdot \overline{S_{bk}} \cdot (\Sigma_{GAMS} > 2.5 \text{ GeV}) \cup (2 \leq MH \leq 4)$$

$$S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot S_{bk} / 10 \quad S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot S_{bk} \cdot \mu C / 4$$

Сеансы 2012,2013 3.65×10^9 распадов 8×10^8 с 1 треком

ФОНЫ К $\pi^0 e^+ \nu \gamma$

- $\pi^0 e^+ \nu$: e^+ легко излучает в воздухе и детекторах
- $\pi^+ \pi^0 \pi^0$: π^+ идентифицирован как e^+ , 1 γ потерян
- $\pi^+ \pi^0$: π^+ идентифицирован как e^+ , 1 γ ложный

Остальные фоны пренебрежимо малы

Отбор событий

IB-часть расходится $\sim 1/\omega$, поэтому я буду нормироваться на $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$ в ограниченном фазовом объёме: ($E_\gamma^* > 30 \text{ MeV}$, $\Theta_{e\gamma}^* > 20^\circ$).
SD мало страдает от этого ограничения.

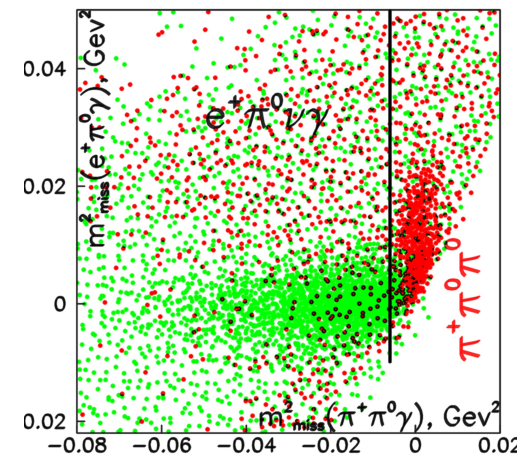
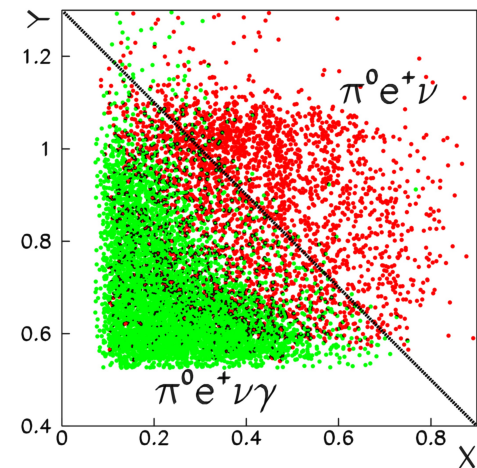
Общие отборы:

- Единственный трек и он идентифицирован как e^+
- Угол между K^+ и e^+ $\Theta > 2 \text{ mrad}$, расстояние между треками $< 1 \text{ см}$ (подавить пучок)
 - Вершина внутри распадного объёма
 - 1 сегмент трека после магнита
- $3 \gamma > 1 \text{ GeV}$, $0.12 \text{ GeV} < m_{12} < 0.15 \text{ GeV}$, $E_3 > 1.5 \text{ GeV}$

Отбор событий

Отборы против конкретных фонов:

- $\Theta_{e\gamma} > 5 \text{ mrad}$ против $\pi^0 e^+ \nu$
- Далиц: $x+y < 1.3$ против $\pi^0 e^+ \nu$
- Недостающая масса к ($\pi^+ \pi^0 \gamma$): $m_{\text{miss}}^2(\pi^+ \pi^0 \gamma) < -0.006 \text{ GeV}^2$
против $\pi^+ \pi^0 \pi^0$
- Баланс энергии: $E_{\text{beam}} - E_{e^+} - E_{\pi^0} - E_{\gamma} > 1 \text{ GeV}$ против $\pi^+ \pi^0$



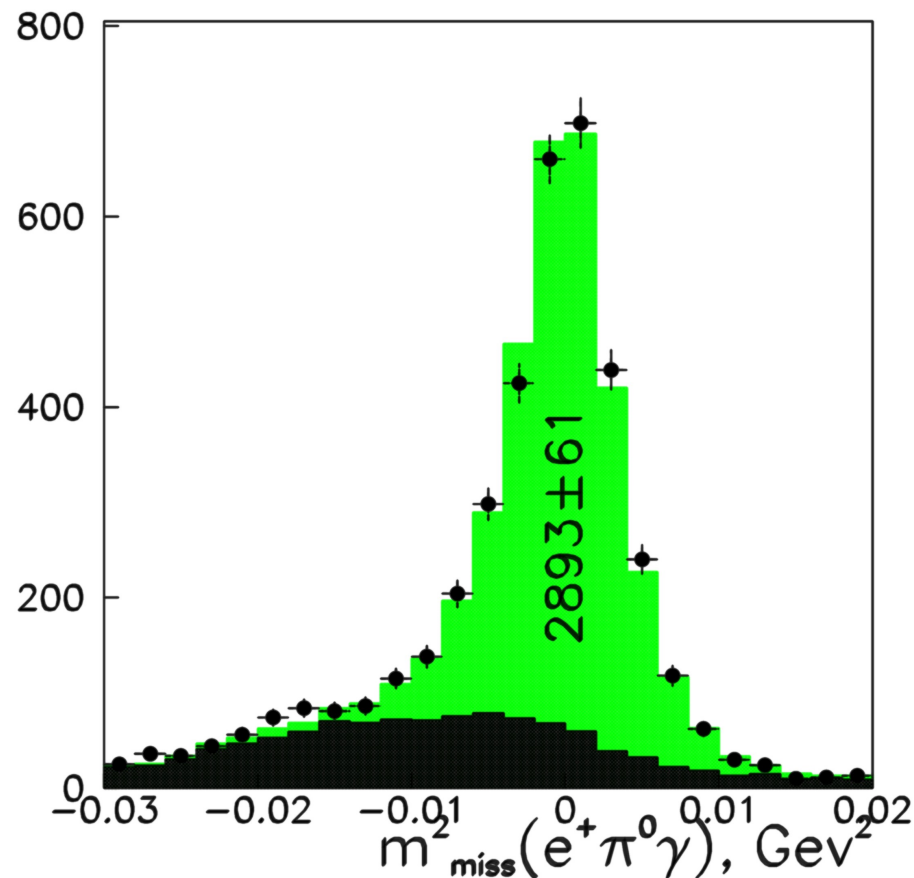
Учёт фона

ФИТ:

$$n(x^2) = \mathbf{s} \times \text{MC}_{\text{signal}}(x^2) + \mathbf{b} \times \text{MC}_{\text{bkg}}(x^2)$$

$$x^2 = m_{\text{miss}}^2(e^+\pi^0\gamma)$$

Эта процедура будет применяться
множественно



Где искать SD?

При больших E_γ^* , $\Theta_{e\gamma}^*$. **А как, например, числом?**

$$T \sim (\hat{V}_{\mu\nu}^+ - A_{\mu\nu}^+) \bar{u}(p_\nu) \gamma^\nu (1 - \gamma_5) v(p_e) + \\ + F_\nu^+ \bar{u}(p_\nu) \gamma^\nu (1 - \gamma_5) \left[\frac{p_\mu}{pq} - \frac{2p_{e\mu} + \hat{q}\gamma_\mu}{2p_{e q}} \right] v(p_e)$$

F_ν^+ - тормозное IB

$A_{\mu\nu}^+$ - *аксиальная аномалия* (AA)

$V_{\mu\nu}^+$ - смесь SD и IB

И все они — сложные функции импульсных инвариантов

Есть программа (В.В. Брагута), вычисляющая $|T|^2$ и вклады SD и AA в произвольной точке фазового объёма согласно ChPT $O(p^4)$

J. Bijnens, G. Ecker, J. Gasser. The DAΦNE Physics Handbook 26 Nov 1992, pp.145-183}

Разбить фазовое пространство на кластеры и вычислить SD/IB в каждом кластере

Фазовое пространство

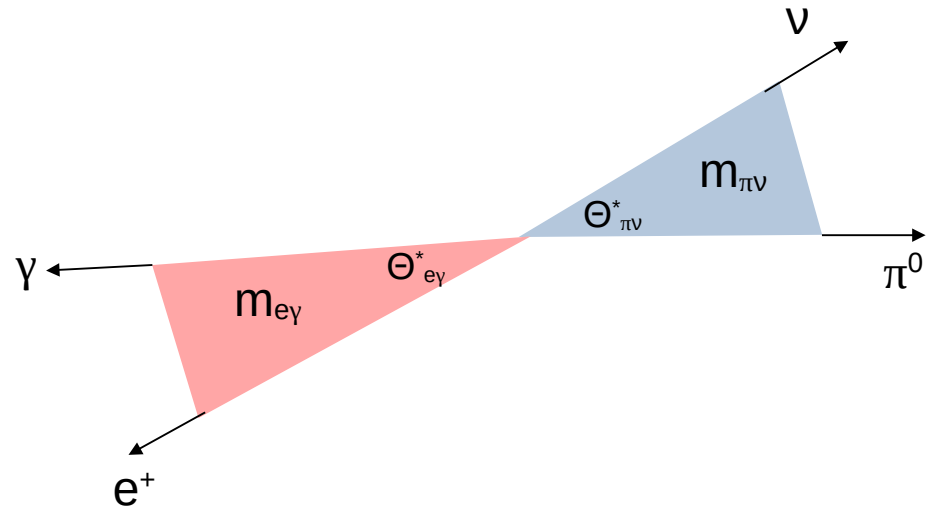
Кинематика определяется 5 переменными:

J. Bijnens, G. Ecker, J. Gasser. The DAΦNE Physics Handbook 26 Nov 1992,
pp.145-183}

B. Kubis et al. arXiv:hep-ph/0611366v1 29 Nov 2006

Мы обошлись 4-мя

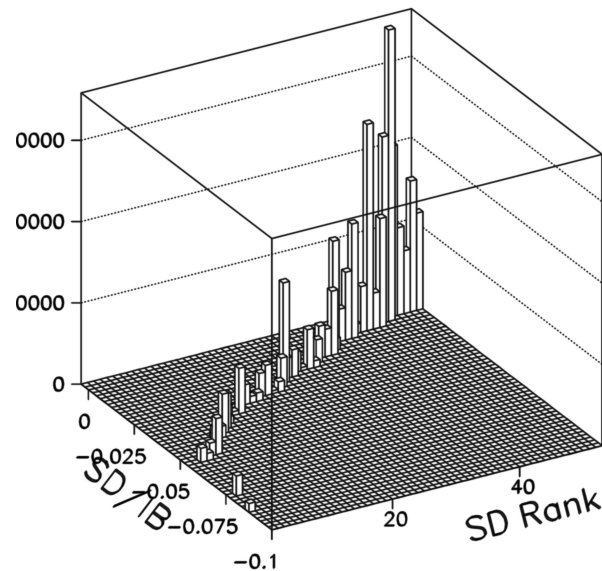
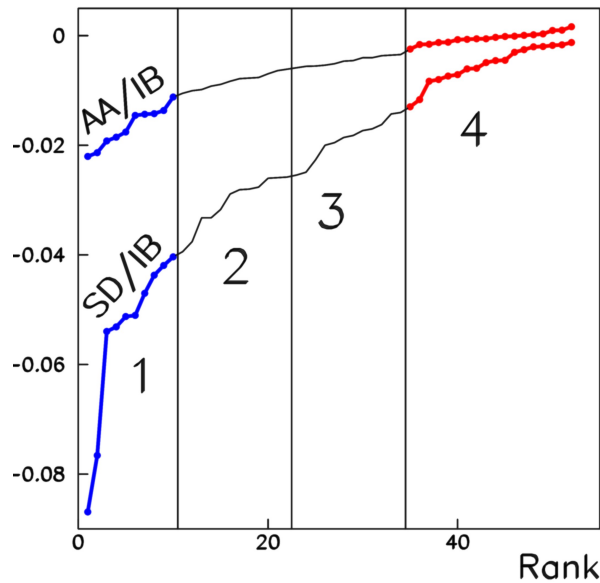
$|T|^2$ не зависит от угла
между плоскостями
Симуляция 10^8 событий



Разбиение фазового пространства

52 кластера ранжированы по SD/IB или AA/IB: в начале — богатые SD (AA), в конце — бедные

Вклады SD, AA - преимущественно **отрицательные**, интерференция



$$\frac{BR(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma)_{SD}}{BR(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma)} = -0.01,$$

$$\frac{BR(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma)_{AA}}{BR(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma)} = -0.0015$$

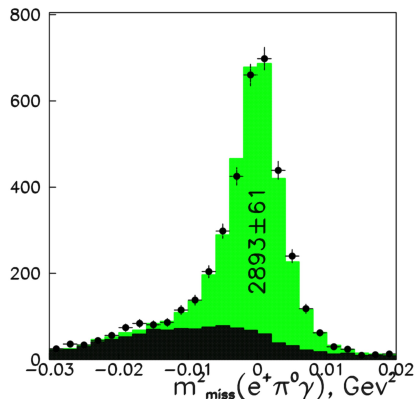
Вычисление вклада SD, способ 1

Группы кластеров: 1 — богатые SD, 4 — бедные SD

$$n_i = \alpha(IB_i + \beta \times SD_i) \quad i=1,4 \quad \beta = 1 \text{ в ChPT, посмотрим, что получится}$$

n_i — из спектра недостающей массы,
 IB_i, SD_i — из МК

$$\beta = \frac{IB_1 n_4 - IB_4 n_1}{SD_4 n_1 - SD_1 n_4}$$



σ_β : перенос ошибок

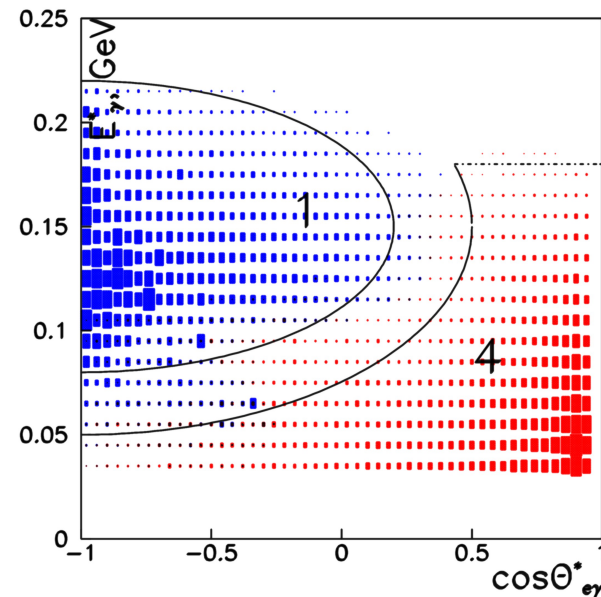
Группы кластеров 1,4 выбраны так, чтобы $\sigma_\beta \rightarrow \min$

Вычисление вклада SD, способ 2

Оказывается, что **1** — богатые SD и **4** — бедные SD
хорошо разделены на плоскости $(\Theta_{e\gamma}^*, E_\gamma^*) \rightarrow$
кластеры не нужны

Области **1** и **4** переопределяются на плоскости
 $(\Theta_{e\gamma}^*, E_\gamma^*)$,

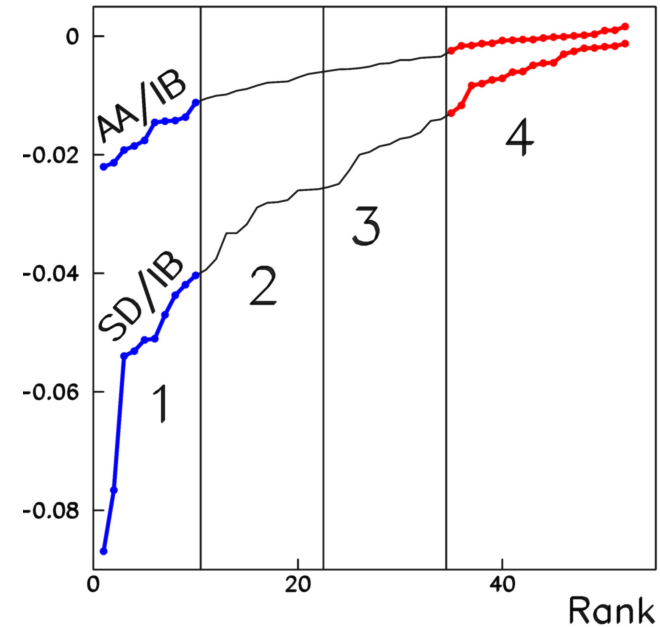
$$\beta = \frac{IB_1 n_4 - IB_4 n_1}{SD_4 n_1 - SD_1 n_4}$$



Вычисление вклада SD, способ 3

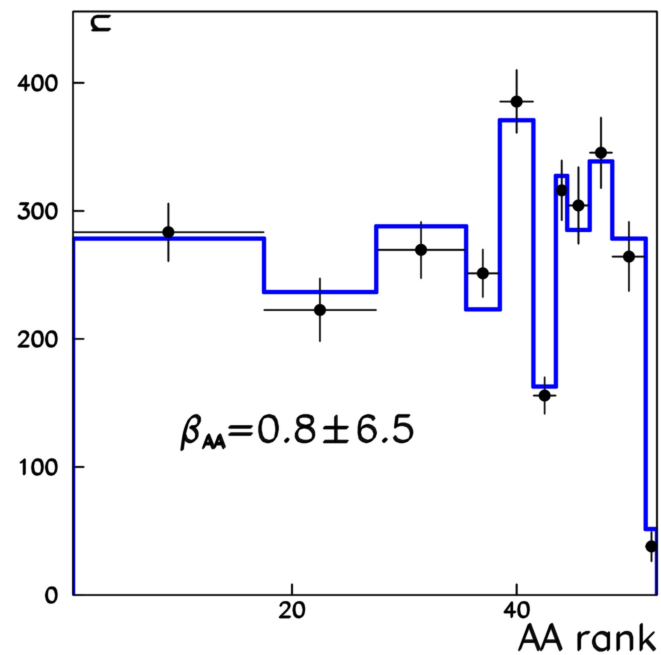
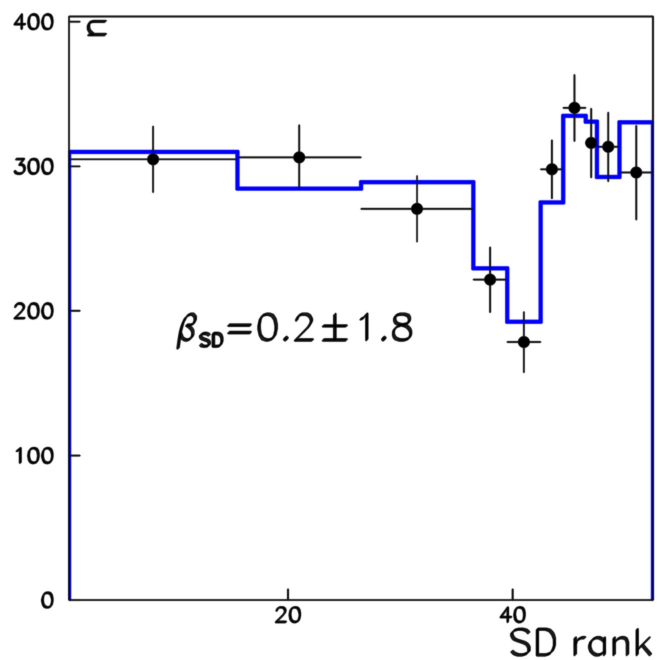
К областям 1 и 4 в анализ добавлены области 2 и 3,
т.о. использован весь доступный фазовый объём

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^4 \frac{[\alpha(IB_i + \beta SD_i) - n_i]^2}{\sigma_i^2} \rightarrow \min$$



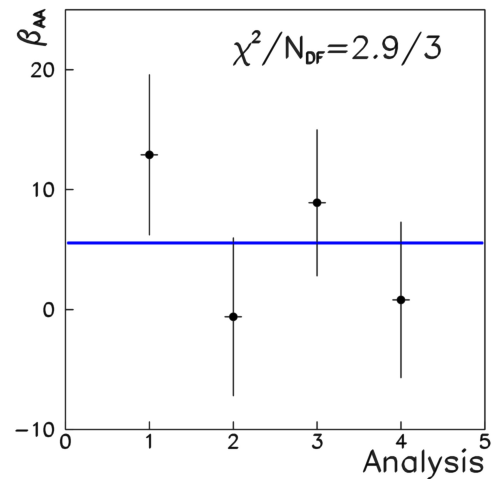
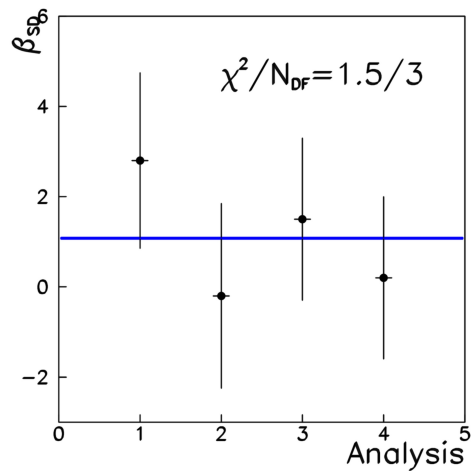
Вычисление вклада SD, способ 4

Весь доступный фазовый объём разбит на 10 частей примерно равной населённости



Результаты

Способ	1	2	3	4	Среднее
β_{SD}	2.8 ± 1.95	-0.2 ± 2.05	1.5 ± 1.8	0.2 ± 1.8	1.08 ± 1.9
β_{AA}	12.9 ± 6.7	-0.6 ± 6.6	8.9 ± 6.1	0.8 ± 6.5	5.5 ± 6.5



Результаты

$$\beta_{SD} = 1.08 \pm 1.9$$

$$\beta_{AA} = 5.5 \pm 6.5$$

Ошибки не позволяют
утверждать наблюдение

Ограничения 90% CL:

$$\frac{BR(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma)_{SD}}{BR(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma)} = \left[\frac{BR(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma)_{SD}}{BR(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma)} \right]_{ChPT} \times \beta_{SD} = 0.01 \times \beta_{SD}$$

$$\beta_{SD} < 3.5$$

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma)_{SD} < 1.2 \times 10^{-5}$$

$$< 5.3 \times 10^{-5} \text{ PDG}$$

$$\beta_{AA} < 13.8$$

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma)_{AA} < 6 \times 10^{-6}$$

Впервые

Для ср.

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma) = 3.09 \times 10^{-4}$$

($E_\gamma^* > 30 \text{ MeV}$, $\Theta_{e\gamma}^* > 20^\circ$)

Заключение

- Проанализировано 3000 событий распада $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$ ($E_\gamma^* > 30$ MeV, $\Theta_{e\gamma}^* > 20^\circ$)
- Проведён поиск структурной компоненты SD:
 $BR(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma)_{SD} < 1.2 \times 10^{-5}$, в 4.5 раза ниже PDG
- **Впервые** проведён поиск аксиальной аномалии AA:
 $BR(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma)_{AA} < 6 \times 10^{-6}$
- Результаты не противоречат ChPT, но чувствительности не хватает для наблюдения как SD, так и AA

