



Исследования распадов заряженных каонов на установке ОКА

О.П.Ющенко
Коллаборация ОКА (ИФВЭ-ИЯИ-ОИЯИ)

17 апреля 2018

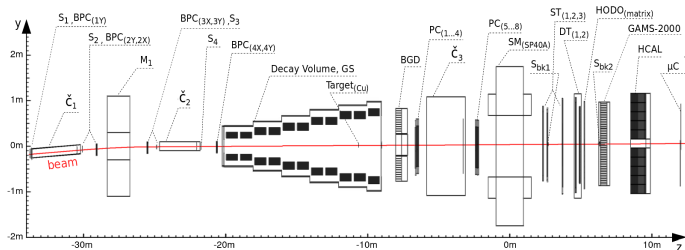
Установка ОКА



Установка ОКА расположена на вторичном пучке протонного синхротрона У-70 в Протвино.

- Используется RF-сепарация для обогащения пучка каонами
 - 2 сверхпроводящих Карлсруэ-ЦЕРН дефлектора.
 - Криогенная система со **сверхтекучим He**
- до **20%** каонов в пучке при $P = 17.7$ GeV/c
- интенсивность до 5×10^5 каонов в 3-х секундный цикл У-70.
- возможна работа при импульсе пучка $P = 12.5$ GeV/c
- r.m.s. импульсного распределения пучка 1.5%.

Установка ОКА



- Триггер: Sc-счетчики $S_1 - S_3$, черенковские счетчики C_1, C_2
- Пучковый спектрометр: магнит M_1 , 7 BPCs (1mm, ~ 1500 кан.)
- Распадный объем (He), 670 Pb-Sc (200 каналов ADC).
- Магнитный спектрометр: SM (0.6 Тм, $200 \times 140 \text{ cm}^2$), $8 \times 2 \text{ mm}$ PC (5k), $3 \times 10 \text{ mm}$ Straw (1k), $2 \times 30 \text{ mm}$ DT (300), MH
- Калориметрия: GAMS-2000 (~ 2300 каналов $4 \times 4 \text{ cm}^2$), BGD (~ 1050 каналов $5 \times 5 \text{ cm}^2$).
- Идентификация мюонов: HCAL GDA ($120 \times 20 \times 20 \text{ cm}^2$ Fe-Sc), 4 Sc плоскости $1 \times 1 \text{ m}^2$

- Форм-факторы полуплептонных распадов:
 - $K^+ \rightarrow e^+ \nu \pi^0$
 - $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \pi^0$
- Форм-факторы полуплептонных распадов с фотоном:
 - $K^+ \rightarrow e^+ \nu \pi^0 \gamma$
 - $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \pi^0 \gamma$
 - $K^+ \rightarrow e^+ \nu \gamma$
 - $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$
- Поиск экзотических объектов: тяжелое нейтрино
- Изучение редких распадов:
 - $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- \gamma$
 - $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$
- Когерентное рождение на ядрах

Поиск тяжелого нейтрино

Рассматривается процесс $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$. Наличие тяжелого нейтрино будет проявляться как пик в распределении по миссинг-массе.

В качестве фонов рассматриваются следующие процессы:

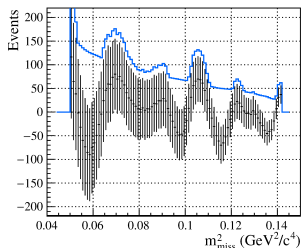
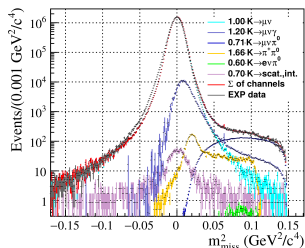
- $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
- $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$
- $K^+ \rightarrow l^+ \nu \pi^0$
- $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$
- Рассеяние каона на материале детектора

Для всех фоновых процессов произведено детальное Монте-Карло с полным учетом геометрии и материалов детектора, процедур оцифровки сигналов, иммитацией триггерных условий.

Поиск тяжелого нейтрино

Процедура отбора включает

- Отбор пучкового и вторичного треков
- Идентификацию вторичного трека
- Использование калориметров как вето.



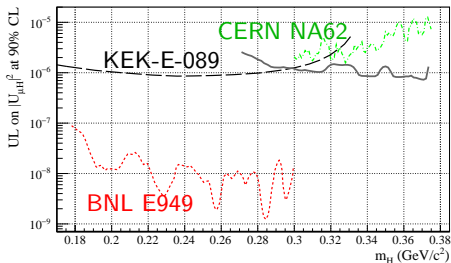
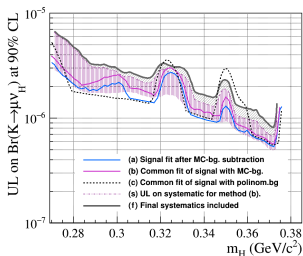
Спектр m_{miss}^2 и количество событий с тяжелым нейтрино для различных значений $m_{\nu_H}^2$

Поиск тяжелого нейтрино

Результатом анализа является верхняя оценка $\text{Br}(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H)$.
Используя соотношение

$$\frac{\Gamma(K \rightarrow \mu \nu_H)}{\Gamma(K \rightarrow \mu \nu)} = |U_{\mu H}|^2 \cdot \lambda \cdot f_h$$

можно получить ограничение на параметр смешивания ($|U_{\mu H}|^2$)



Распад $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\gamma$

Текущее состояние:

- Статистика - 7 событий (1989 год)
- $Br = (1.04 \pm 0.31) \times 10^{-4}$ для $E_\gamma > 5$ MeV в с.ц.м.

Для анализа в эксперименте ОКА использовались данные двух сеансов.

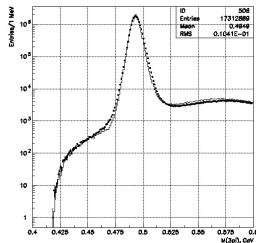
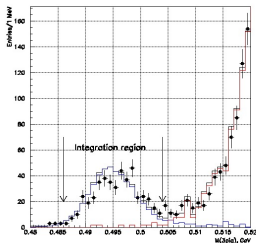
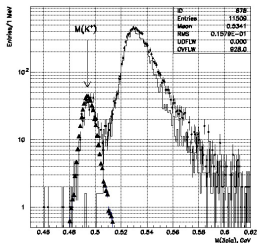
Процедура анализа включала отбор по:

- **качеству** каонного и вторичных треков.
- **положению и качеству** вершины распада
- **идентификации** вторичных треков
- **энергии** фотона
- инвариантной массе $\pi\gamma$
- **кинематике** системы $\pi^+\pi^+\pi^-\gamma$

Распад $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\gamma$

Массовый спектр системы $\pi^+\pi^+\pi^-\gamma$ для всех энергий фотона (слева) и для $E_\gamma^* > 30$ MeV (в центре) отлично согласуется с комбинацией фоновое+сигнальное МС.

Качество описания данных можно оценить из массового спектра $\pi^+\pi^+\pi^-$ (справа).



Распад $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\gamma$

Результаты исследования распада:

- Статистика: ~ 450 событий
- $Br = (0.71 \pm 0.05) \times 10^{-5}$ для $E_\gamma > 30$ MeV в с.ц.м.
Предсказание теории: $(0.665 \pm 0.005) \times 10^{-5}$.
- Измерен энергетический спектр фотонов. Спектр и брэнчинг совпадают в пределах погрешностей с вычислениями в киральной теории возмущений.
- Измерены асимметрии верх-низ для фотона относительно нормали к плоскости распада адронной системы:
 $A_{s1} = -0.04 \pm 0.05$ и $A_{s2} = +0.03 \pm 0.05$ для различных определений нормали.

K_{e3} формфакторы

Наиболее общий вид амплитуды распада $K^+ \rightarrow l^+ \nu \pi^0$ имеет вид:

$$M = \frac{-G_F V_{us}}{2} \bar{u}(p_\nu)(1+\gamma^5)[((P_K+P_\pi)_\alpha f_+ + (P_K-P_\pi)_\alpha f_-)\gamma^\alpha - 2m_K f_S - i\frac{2f_T}{m_K}\sigma_{\alpha\beta}P_K^\alpha P_\pi^\beta]v(p_l)$$

Форм-факторы f_+ и f_- ($\rightarrow m_l/M_K \cdot f_0$) – функции $t = (P_K - P_\pi)^2$.
Скалярный и тензорный форм-факторы (f_S и f_T) связываются с “новой физикой”.

Основные параметризации

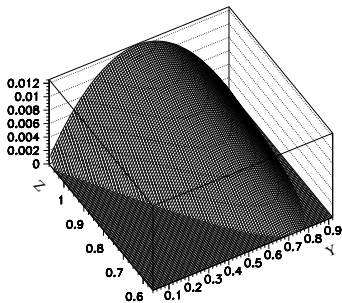
$$\text{ChPT : } f_+(t) = \underbrace{f_+(0)(1 + \lambda'_+ t/m_{\pi^+}^2)}_{O(p^4)} + \overbrace{\frac{1}{2}\lambda''_+ t^2/m_{\pi^+}^4}^{O(p^6)}$$

$$\text{Pole : } f_+(t) = f_+(0) \frac{m_V^2}{m_V^2 - t}$$

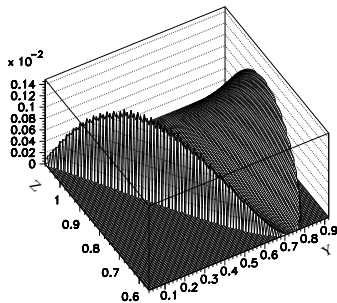
$$\text{Dispersive : } f_+(t) = f_+(0) \exp\left(\frac{t}{m_\pi^2}(\Lambda_+ + H(t))\right)$$

K_{e3} формфакторы

Анализ K_{e3} распада основан на фите распределения событий на диаграмме Далица в переменных $y = 2E_e^*/M_K$ and $z = 2E_\pi^*/M_K$



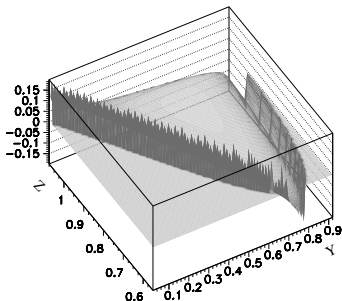
Регулярный вклад



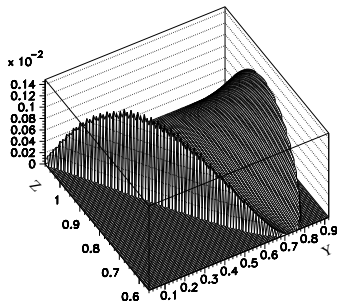
Тензорный вклад

K_{e3} формфакторы

При анализе K_{e3} распада **исключительно важны** радиационные поправки.



Радиационный вклад



Тензорный вклад

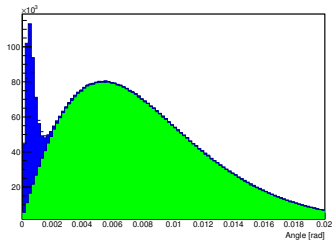
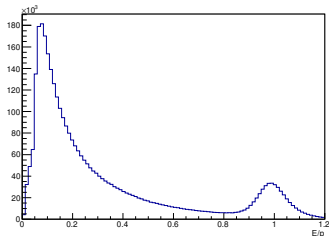
Для анализа использованы данные двух сеансов.

- Позитроны по E/p в электромагнитном калориметре.
- Строго 2 ливня в калориметрах. $0.11 < M_{\gamma\gamma} < 0.16$ GeV
- Кинематический фит гипотезы $K^+ \rightarrow e^+ \nu \pi^0$
- Отбор по угловым переменным.

Количество событий: **5.25M** (самая большая в мире!)

Оценка вклада фона: **< 0.5%** ($K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$).

Произведенное MC в 3 раза больше статистики в RD.



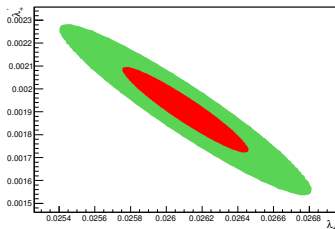
K_{e3} анализ. Результаты.

Фит с линейным форм-фактором: $\lambda_+ = (2.95 \pm 0.022) \times 10^{-2}$.

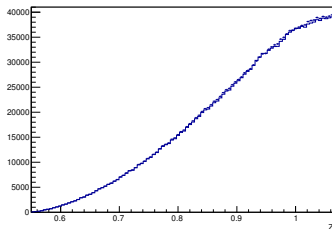
Вычисления в $O(p^4)$ ChPT: $\lambda_+^{ChPT} = (3.1 \pm 0.06) \times 10^{-2}$.

Результаты эксперимента **ISTRA+**: $\lambda_+ = (2.97 \pm 0.050) \times 10^{-2}$.

$\lambda'_+ (10^{-2})$	m [GeV]	$\Lambda_+ (10^{-2})$	$\lambda''_+ (10^{-3})$	$f_t/f_+(0) (10^{-2})$	$f_s/f_+(0) (10^{-3})$
$2.611^{+0.035}_{-0.035}$	$0.891^{+0.003}_{-0.003}$	$2.458^{+0.018}_{-0.018}$	$1.91^{+0.19}_{-0.18}$		
$2.612^{+0.035}_{-0.035}$	$0.891^{+0.004}_{-0.006}$	$2.459^{+0.019}_{-0.018}$	$1.90^{+0.19}_{-0.19}$	$-1.24^{+1.6}_{-1.3}$ $-1.85^{+2.4}_{-1.2}$ $-1.14^{+1.5}_{-1.3}$	$0.13^{+3.8}_{-4.6}$ $1.95^{+3.7}_{-7.4}$ $-0.13^{+4.5}_{-3.9}$



Корреляция λ'_+ - λ''_+



Описание данных

- Полученные результаты в отличном согласии с предыдущими измерениями.
- f_+ и f_- сравнимы с нулем
- Максимальная статистика.

Заключение

- Эксперимент ОКА успешно набирает статистику в течении нескольких лет (последний сеанс завершился в 15.04.18).
- На части статистики завершены анализы процессов $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$, $K^+ \rightarrow e^+ \nu \pi^0$, $K^+ \rightarrow 2\pi^+ \pi^- \gamma$.
- В стадии завершения анализы процессов $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \pi^0$, $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$, когерентное рождение системы $K\pi$ на ядрах Al.
- Идет анализ и других распадов.
- В стадии обработки данные последних сеансов (увеличение статистики **более чем в 2 раза**)
- Осуществляется производство Монте-Карло для всех сеансов
- Все анализы будут **заново проведены** на увеличенной статистике.