

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Представляется цикл работ «**Изучение редких и поиск запрещённых распадов заряженных каонов**».

Коллектив соавторов:

1. Гудзовский Е.А.,
2. Кекелидзе В.Д.,
3. Мадигожин Д.Т.,
4. Мишева М.Х.,
5. Потребеников Ю.К.,
6. Шкаровский С.Н.

В представленный цикл работ входят 11 публикаций:

1. J.R. Batley *et al.* (NA48/2 Collaboration). Measurement of the form factors of charged kaon semileptonic decays, JHEP 1810 (2018) 150.
2. J.R. Batley *et al.* (NA48/2 Collaboration). First Observation and Study of the  $K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm}\pi^0 e^+ e^-$  Decay, Phys.Lett. B788 (2019) 552-561.
3. Eduardo Cortina Gil *et al.* (NA62 Collaboration). Search for heavy neutral lepton production in  $K^+$  decays, Phys.Lett. B778 (2018) 137-145.
4. Eduardo Cortina Gil *et al.* (NA62 Collaboration). Searches for lepton number violating  $K^+$  decays, Phys.Lett. B797 (2019) 134794.
5. E. Goudzovski. Kaon experiments at CERN: recent results and prospects. MESON 2016. EPJ Web of Conferences, 130 (2016) 01019.
6. М.Н.Мишева. First observation and study of  $K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm}\pi^0 e^+ e^-$  decay at the NA48/2 experiment. Proc. of 50th Rencontres de Moriond on QCD and High Energy Interactions. 21-28 Mar 2015. La Thuile, Italy. ARISF 2015. p.237-240.
7. D. Madigozhin. New and recent results from NA48. Proc. of 52nd Rencontres de Moriond QCD and High Energy Interactions, La Thuile, Aosta, Italy, 25 Mar - 1 Apr 2017. ARISF 2017. p.65-68.
8. S. Shkarovskiy. Recent QCD-related results from kaon physics at CERN. Excited QCD 2017, Sintra, Portugal, 7-13 May 2017. Acta Phys.Polon.Supp. 10 (2017) 1153-1158.
9. S. Shkarovskiy. Recent results from NA48. ICPPA 2017, Moscow, Russia, 2-5 Oct 2017. J.Phys.Conf.Ser. 934 (2017) no.1, 012031.

10. S. Shkarovskiy. Recent measurements of  $K_{l3}^{\pm}$  form factors at NA48/2. QFTHEP 2017, Yaroslavl, Russia, 26 Jun- 3 Jul, 2017. EPJ Web Conf. 158 (2017) 03007.
11. D. Madigozhin. Recent NA48/2 results on rare kaon decays. ISMD 2018, Singapore, 3-7 Sep 2018. EPJ Web Conf. 206 (2019) 05001.

Цикл работ объединяет результаты анализа данных эксперимента NA48/2 по редким распадам [1,2,6-11] и результаты поиска в эксперименте NA62 явлений, запрещённых в рамках стандартной модели [3,4,5]:

- На основе данных эксперимента NA48/2 с высокой точностью выполнено измерение форм-факторов заряженных полулептонных распадов  $K^{\pm} \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$  ( $K_{e3}^{\pm}$ ) и  $K^{\pm} \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_{\mu}$  ( $K_{\mu3}^{\pm}$ ).
- Впервые обнаружен сигнал от распада  $K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} \pi^0 e^+ e^-$ . На основе анализа данных эксперимента NA48/2 измерена относительная вероятность этого распада.
- На основе данных эксперимента NA62 на рекордном уровне чувствительности был проведен поиск двойных безнейтринных распадов каона  $K^+ \rightarrow \pi^- e^+ e^+$  и  $K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ \mu^+$ , нарушающих закон сохранения лептонного числа. На уровне достоверности 90% установлены верхние пределы на парциальные ширины этих распадов.
- Проведен поиск рождения тяжелого нейтрального лептона в распадах  $K^+$  с использованием данных эксперимента NA62.

Результаты, полученные при выполнении цикла работ:

1. Измерения форм-факторов распада  $K^{\pm} \rightarrow \pi^0 l^+ \nu$  ( $K_{l3}^{\pm}$ , где  $l = e, \mu$ ), совместно с величиной полной вероятности этого распада, позволяют определить модуль элемента матрицы СКМ  $|V_{us}|$ . Группой ОИЯИ в рамках эксперимента NA48/2 было выполнено измерение векторного  $f_+$  и скалярного  $f_0$  форм-факторов распадов  $K_{e3}$ ,  $K_{\mu3}$  для трёх наиболее используемых параметризаций  $f_+$  и  $f_0$ , а также комбинированное измерение этих форм-факторов для  $K_{l3}$ .

Далиц-плоты отобранных событий показаны на рис. 1. После поправки на фон они были использованы для извлечения параметров форм-факторов путём фитирования. Полная статистика отобранных событий составила  $4.4 \cdot 10^6$  для  $K_{e3}$  и  $2.3 \cdot 10^6$  для  $K_{\mu3}$ . Наибольшие вклады в фон дают распады каона на  $\pi^{\pm} \pi^0$  и  $\pi^{\pm} \pi^0 \pi^0$  ( $0.6 \cdot 10^{-3}$  и  $2.5 \cdot 10^{-3}$  для  $K_{e3}$  и  $K_{\mu3}$  соответственно). Для наглядной оценки качества фита на рис. 2 приведены экспериментальные распределения по энергии пиона и лептона в системе центра масс каона после вычитания фона вместе с результатами фитирования с использованием параметризации Тейлора для описания форм-факторов.

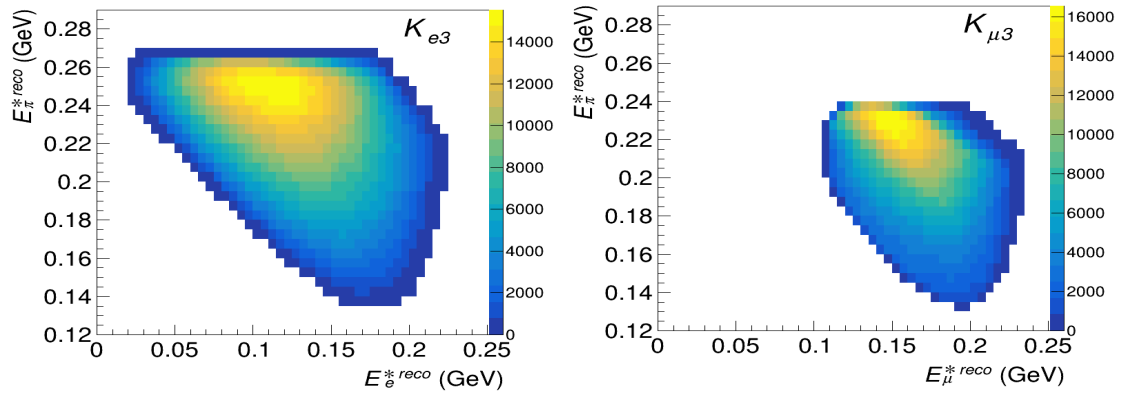


Рисунок 1: распределение по измеренным энергиям пиона и лептона в системе центра масс каона для отобранных событий  $K_{13}^{\pm}$  распадов (Далиц-плоты).

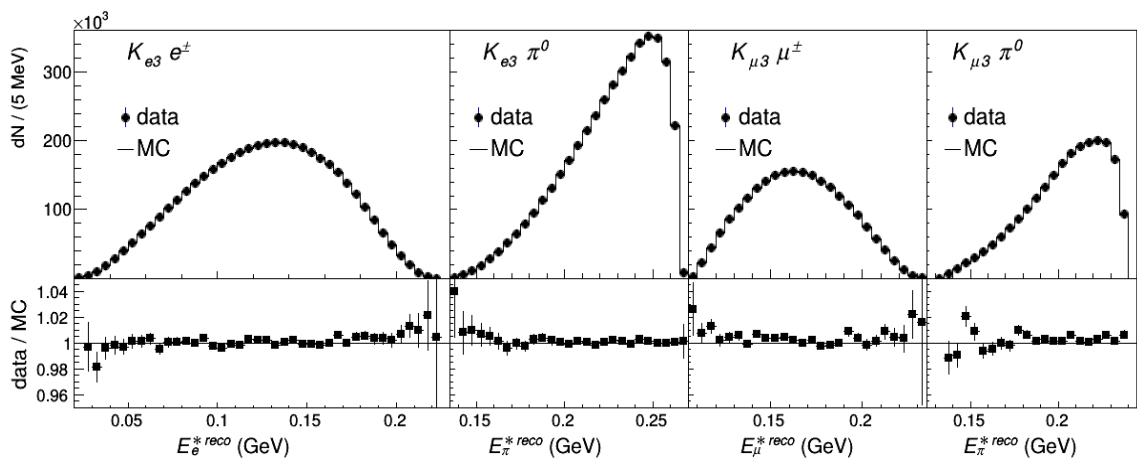


Рисунок 2: Распределения по восстановленным энергиям лептона и пиона для данных после вычитания фона и результаты фитирования форм-факторов рядами Тейлора.

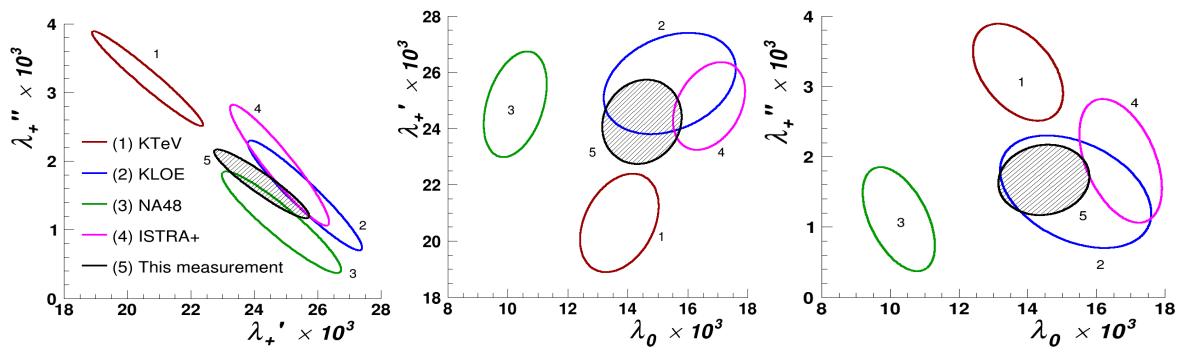


Рисунок 3: Контуры, соответствующие доверительному уровню 39.4% (одному стандартному отклонению для всех ошибок в случае двух измерений), для параметров форм-факторов при их разложения в ряд Тейлора. Результаты приведены для комбинированного анализа мод  $K_{e3}$  и  $K_{\mu3}$ .

На рис. 3 представлены результаты объединенного измерения для  $K_{e3}$  и  $K_{\mu3}$  в NA48/2 и их сравнение с соответствующими результатами экспериментов KTeV, KLOE, NA48 и ISTRA+. Полученные результаты согласуются с признанными измерениями других экспериментов. Комбинированный результат настоящей работы для  $K_{e3}$  и  $K_{\mu3}$  является наиболее точным на текущий момент.

2. На основе данных, полученных в эксперименте NA48/2 в 2003-2004 годах, было отобрано 4919 кандидатов в распад каона  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$  и было сделано измерение относительной вероятности этого распада:  $BR(K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-) = (4.237 \pm 0.063_{\text{stat}} \pm 0.033_{\text{syst}} \pm 0.126_{\text{ext}}) \cdot 10^{-6}$ .

Радиационный распад каона  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$ , происходящий через виртуальный обмен фотоном с последующим образованием электрон-позитронной пары, ранее не наблюдался экспериментально. Распад представляет интерес для проверки моделей квантовой хромодинамики при низких энергиях, таких, как киральная пертурбативная теория возмущений (ChPT) — эффективная теория поля, описывающая сильные взаимодействия при переданных импульсах ниже 1 ГэВ.

В качестве нормализационного процесса для измерения относительной вероятности распада  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$  был выбран распад  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0_D$ . Было отобрано  $16.3 \cdot 10^6$  кандидатов в этот распад. Оценка фона в сигнале  $\pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$  составила 4.9%, фон для нормализационного канала  $\pi^\pm \pi^0_D$  составил 0.11%. Для сигнала реконструированные распределения масс  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  и  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$  по эффективным массам показаны на рисунке 4. На рисунке 5 приведены аналогичные распределения масс  $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$  и  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0_D$  для нормализационной моды.

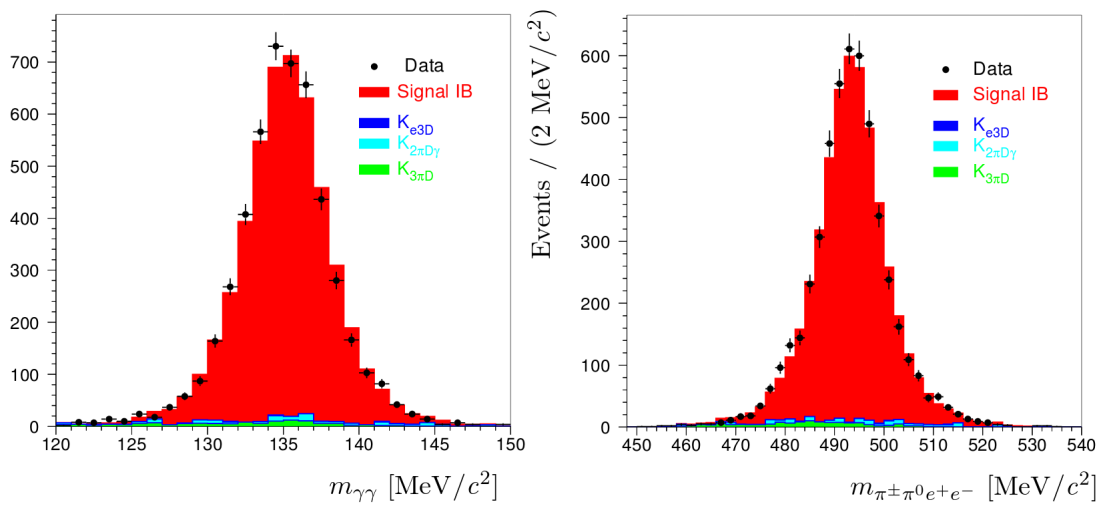


Рисунок 4: Кандидаты сигнала  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$ . Слева восстановленная масса  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ . Справа — масса  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$ .

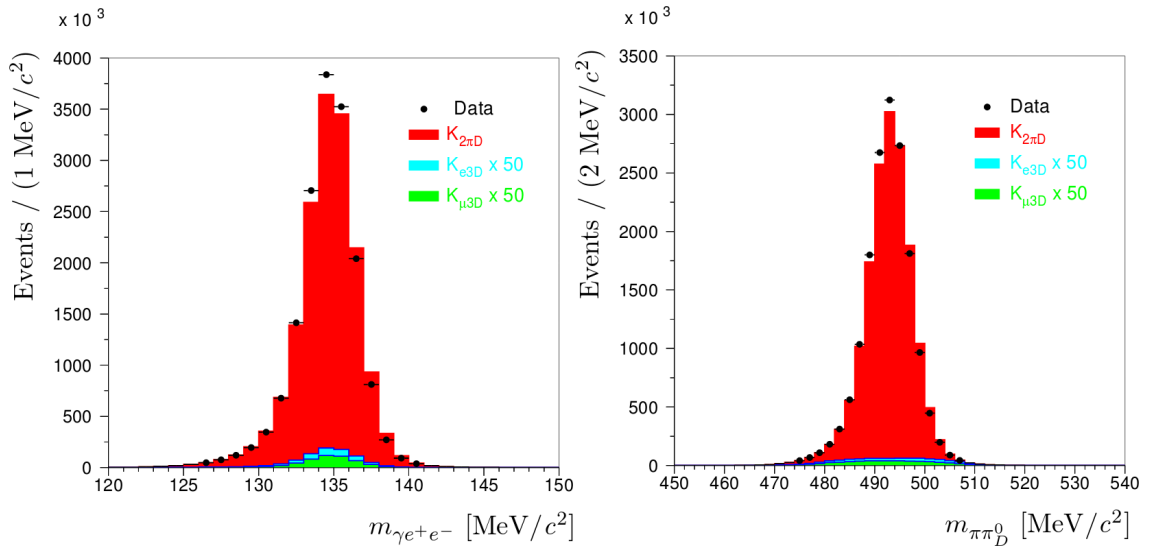


Рисунок 5: Кандидаты в события нормализационного сигнала  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi_D^0$ . Слева: восстановленная масса  $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$ . Справа: реконструированная масса  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi_D^0$ .

Результат измерения относительной вероятности:  $BR(K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi_D^0 e^+ e^-) = (4.237 \pm 0.063_{\text{stat}} \pm 0.033_{\text{syst}} \pm 0.126_{\text{ext}}) \cdot 10^{-6}$ . Систематическая ошибка вызвана преимущественно неопределенностью радиационных эффектов, а внешняя ошибка (ext) связана с неопределенностью относительной вероятности распада  $\pi_D^0$ .

3. С использованием данных, полученных в эксперименте NA62 в ЦЕРН на рекордном уровне чувствительности проведен поиск двойных безнейтринных распадов каона  $K^+ \rightarrow \pi^- e^+ e^+$  и  $K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ \mu^+$ , нарушающих сохранение лептонного числа. Триггер для распадов на лептонные пары в рамках системы сбора данных NA62 был предложен и реализован группой, координируемой сотрудником ЛФВЭ. Физический анализ данных также проведен сотрудником ЛФВЭ, который является координатором рабочей группы NA62 по изучению редких и запрещенных процессов.

В рамках стандартной модели нейтрино имеют нулевую массу, но открытие нейтринных осцилляций показало, что массы нейтрино отличны от нуля. Это мотивирует поиск процессов, нарушающих сохранение лептонного числа, поскольку их наблюдение позволяет установить майорановскую природу нейтрино. На рис. 6 для отобранных событий из экспериментальных данных и смоделированных источников фона показаны распределения восстановленных масс систем  $\pi^- e^+ e^+$  и  $\pi^- \mu^+ \mu^+$ . Ожидаемый фон в области сигнала составил  $0,16 \pm 0,03$  и  $0,91 \pm 0,41$  событий, а количество реально наблюдаемых событий в данных – 0 и 1, соответственно. Этот факт позволил установить верхние пределы на парциальные ширины данных распадов  $2,2 \times 10^{-10}$  и  $4,2 \times 10^{-11}$  на уровне достоверности 90%, соответственно. Полученный результат привёл к

уточнению мировых данных по возможному несохранению лептонного числа. Анализ данных 2018 года позволит улучшить чувствительность.

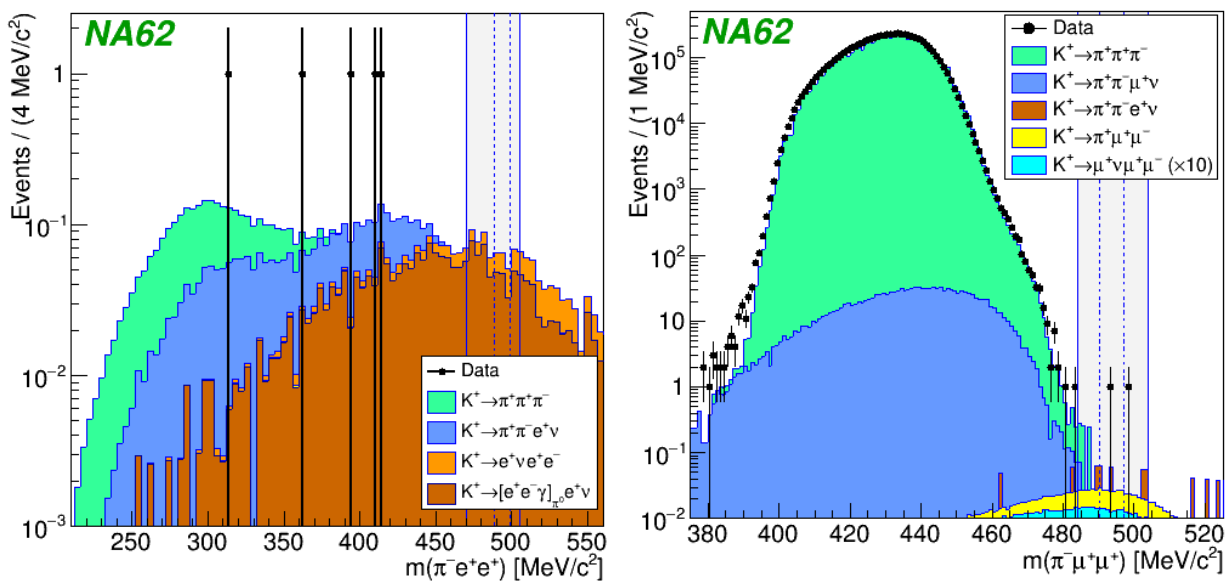


Рисунок 6: Распределения реконструированной массы для распадов  $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^+$  (слева) и  $\pi^+ \mu^+ \mu^+$  (справа). Вертикальные линии указывают принятые границы сигнала в области массы каона.

4. На основе данных, полученных с минимально смещающим триггером в эксперименте NA62 в ЦЕРН в 2015 году, проведен поиск распадов  $K^+$  на электрон или мюон и тяжёлый нейтральный лептон в диапазоне масс нейтрального лептона 170-448 МэВ/ $c^2$ .

Многие расширения Стандартной Модели (СМ) предсказывают новые частицы - такие, как тяжелые нейтральные лептоны (HNL, обозначенное ниже N) или тяжелые нейтрино, которые могут рождаться в распадах каонов. Смешивание между HNL и обычными нейтрино Стандартной Модели может приводить к образованию HNL в таких распадах мезонов, как  $K^+ \rightarrow l^+ N$  ( $l = e, \mu$ ). Относительная вероятность распада каона в этом случае определяется массой HNL  $m_N$  и параметром такого смешивания  $|U_{14}|^2$ .

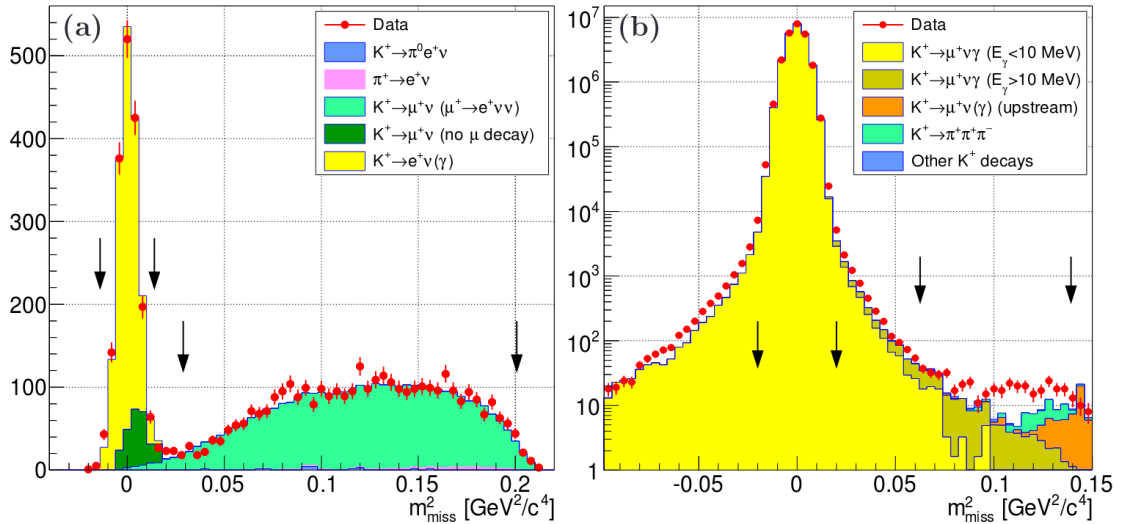


Рисунок 7: Распределения по квадрату недостающей массы для экспериментальных данных и для результатов моделирования, при отборе событий с  $e^+$  (a) и  $\mu^+$  (b). Пары вертикальных стрелок на каждом графике указывают ожидаемые области сигнала от обычного нейтрино (в области нуля) и от HNL.

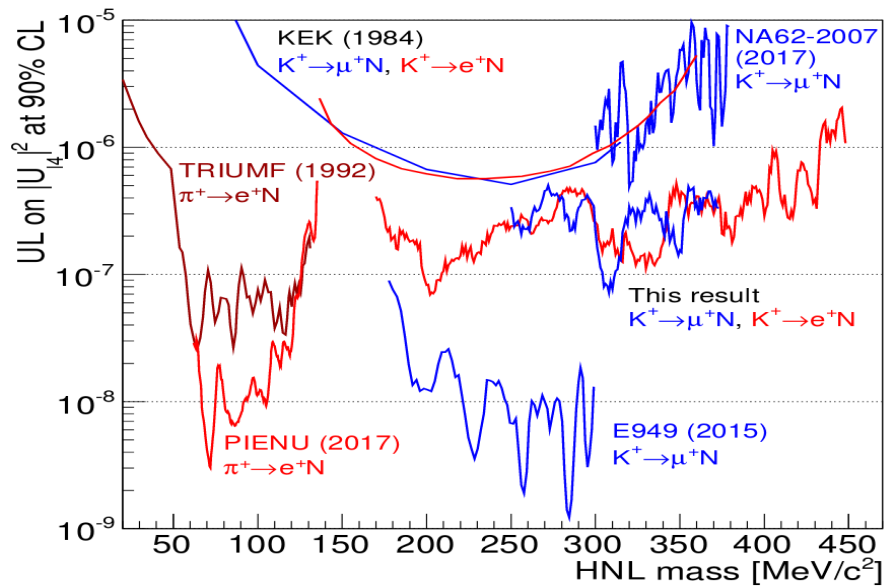


Рисунок 8: Верхние пределы на величину  $|U_{14}|^2$  при доверительном уровне 90%, полученные для разных предполагаемых масс HNL.

На рисунке 7 показаны распределения по квадрату недостающей массы для отобранных событий в экспериментальных данных и в результатах моделирования. Поиск сигнала HNL проводился в интервале, обозначенном на рисунке стрелками:  $0.03\text{--}0.20$   $\text{ГэВ}^2/\text{с}^4$  для  $e^+$  и  $0.06\text{--}0.14$   $\text{ГэВ}^2/\text{с}^4$  для  $\mu^+$ . Поиск распада  $K^+ \rightarrow l^+ N$  состоял в попытке обнаружения пика над фоном в предполагаемой области масс HNL.

Полученные верхние пределы на  $|U_{14}|^2$  при доверительном уровне 90% показаны на рисунке 8 вместе с результатами предыдущих исследований HNL-процессов в распадах  $\pi^+$  (TRIUMF, PIENU) и  $K^+$  (КЕК,

Е949, NA62-2007). Полученный результат улучшает ранее полученные ограничения на  $|U_{e4}|^2$  при массах выше 300 МэВ/c<sup>2</sup>.

Все представленные работы соответствуют программе проекта NA62 и темы 1096, в рамках которых они выполнены. Их результаты получены при определяющем вкладе сотрудников ЛФВЭ ОИЯИ и опубликованы в ведущих журналах [1-4]. Предварительные результаты были представлены сотрудниками ЛФВЭ на международных конференциях от имени коллабораций NA48/2 и NA62 [5-11] .

Председатель НТС ЛФВЭ \_\_\_\_\_ Е.А. Строковский

Секретарь НТС \_\_\_\_\_ С.П. Мерц