

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт ядерных исследований
Российской академии наук

Шайхиев Артур Тагирович

ПОИСК ТЯЖЁЛЫХ НЕЙТРИНО В РАСПАДАХ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ КАОНОВ

01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук

Куденко Ю.Г.

Москва — 2015

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Основная задача — поиск тяжелых нейтрино в распадах положительных каонов, используя данные эксперимента E949:

- Поиск распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ в спектре импульсов мюонов от распадов $K^+ \rightarrow \mu^+ + \text{anything}$
 - Идентификация мюонов в основном триггере эксперимента, оптимизированном для регистрации пионов от редкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$
- Поиск пиков от тяжелых нейтрино в спектре импульсов вылетающих мюонов ниже пика от распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ (импульс мюона $p_\mu = 236$ МэВ/с)

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД

Автор является основным разработчиком анализа по поиску тяжелых нейтрино в распадах остановленных каонов:

- предложен и разработан метод поиска и идентификации мюона в пионном триггере эксперимента E949,
- проведена оптимизация критериев отбора для идентификации мюона в детекторе,
- измерен аксептанс распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ в зависимости от импульса вылетающего мюона (массы тяжелого нейтрино) и вычислена чувствительность эксперимента к искомому распаду в отсутствии фоновых процессов,
- измерена вероятность распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, совпадающая в пределах ошибки с измеренными ранее значениями, для проверки измерения аксептанса в области высоких импульсов мюонов,
- измерена вероятность распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$ ($140 < p_\mu < 200$ МэВ/с), совпадающая в пределах ошибки с измеренными ранее значениями, для проверки измерения аксептанса в области низких импульсов мюонов,
- определена систематическая ошибка аксептанса установки к распаду $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$,
- измерена зависимость импульсного разрешения детектора E949 от импульса вылетающего мюона,
- разработан алгоритм поиска пиков от тяжелых нейтрино в спектре импульсов мюонов на основе статистического подхода, примененного для открытия бозона Хиггса в эксперименте ATLAS,
- получено лучшее в мире модельно независимое ограничение на элемент матрицы смешивания между мюонным и тяжелым нейтрино, $|U_{\mu H}|^2$, в диапазоне масс тяжелого нейтрино 175–300 МэВ/с².

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Для поиска тяжелых нейтрино в распаде $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ разработан метод анализа мюонных событий, прошедших основной триггер эксперимента E949, оптимизированный для регистрации пионов от редкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu^-$.
2. Оптимизация критериев отбора для идентификации мюона в детекторе и измерение аксептанса распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ в зависимости от импульса вылетающего из мишени мюона в основном триггере эксперимента, настроенном на идентификацию пионов.
3. Измерение вероятностей распадов $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ и $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$ ($140 < p_\mu < 200$ МэВ/с) для проверки определения аксептанса к распаду $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ в основном триггере эксперимента, изучения формы фона и оценки систематических ошибок.
4. Чувствительный поиск тяжелых нейтрино в распаде $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ в диапазоне масс 175–300 МэВ/с², используя данные эксперимента E949 с общим числом остановленных каонов равным 1.70×10^{12} .
5. Получение нового модельно независимого ограничения на элемент матрицы смешивания между мюонным и тяжелым нейтрино, $|U_{\mu H}|^2$, в диапазоне масс 175–300 МэВ/с².

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Результаты исследования были представлены автором на следующих конференциях:

1. Научная сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», ИТЭФ, Москва, 23–27 ноября 2009.
2. «16th International Seminar on High Energy Physics» , QUARKS 2010, Коломна, Россия, 6–12 июня 2010.
3. 15-я Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц, МГУ, Москва, 18–24 августа 2011.
4. «18th International Seminar on High Energy Physics», QUARKS 2014, Суздаль, Россия, 2–8 июня 2014.
5. «XXX-th International Workshop on High Energy Physics — Particle and Astroparticle Physics, Gravitation and Cosmology: Predictions, Observations and New Projects», HEPFT 2014, ИФВЭ, Протвино, Россия, 23–27 июня 2014.
6. «2-nd Symposium Theory Meeting Experiment: NEUTRINOS and COSMOS», TMEX 2014, Варшава, Польша, 3–5 сентября 2014.
7. «International Conference-Session of the Section of Nuclear Physics of the Physical Sciences Division of the Russian Academy of Sciences», МИФИ, Москва, 17–21 ноября 2014.

а также на научной конференции МФТИ в 2008, 2009 и 2010 гг.

ПУБЛИКАЦИИ

Непосредственно по материалам диссертации опубликованы следующие статьи:

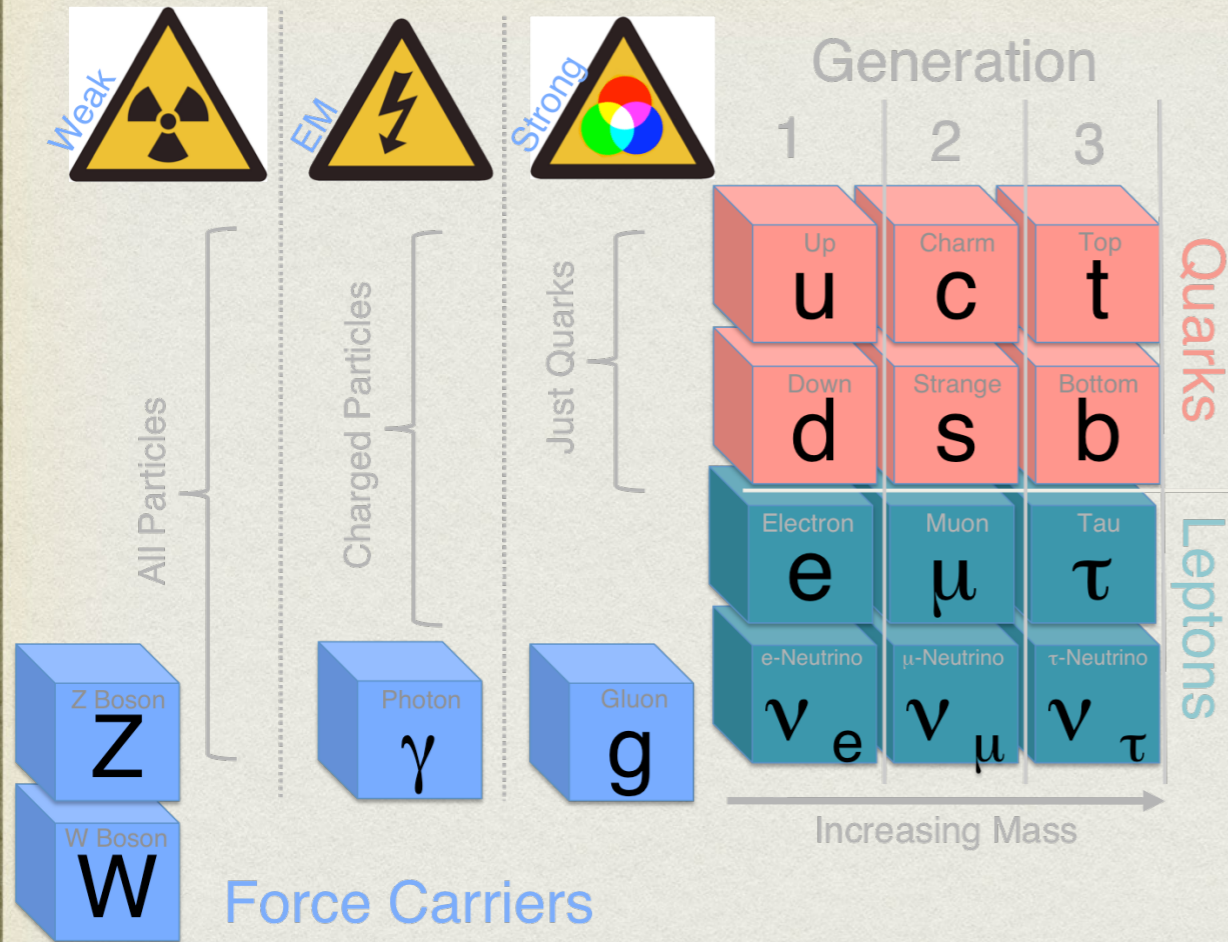
1. Шайхиев А.Т., Куденко Ю.Г. и Хотянцев А.Н. Поиск тяжелых нейтрино в распадах положительных каонов // Ядерная физика, 2011. т.74, No5, с.814– 819.
2. Artamonov A.V., Bassalleck B., Bhuyan B.,..., Shaikhiev A.T. et al. Search for heavy neutrinos in $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ decays // arXiv:1411.3963, PRD (2015)
3. Шайхиев А.Т. Поиск тяжелых нейтрино в распадах положительных каонов // Труды 51-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть VIII. Проблемы современной физики. М.:МФТИ, 2008.
4. Шайхиев А.Т. Поиск тяжелых нейтрино в распадах положительных каонов // Труды 52-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть VIII. Проблемы современной физики. М.:МФТИ, 2009. с.135–137.
5. Шайхиев А.Т. Поиск тяжелых нейтрино в распадах положительных каонов // Труды 53-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть VIII. Проблемы современной физики. М.:МФТИ, 2010. с.259–260.
6. Shaykhiev A.T. Search for heavy neutrino in rare kaon decays // Proceedings of the 16th International Seminar on High Energy Physics (QUARKS 2010).
7. Shaikhiev A. Search for heavy neutrino in rare kaon decays // Proceedings of the Fifteenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics. Singapore, Singapore: World Scientific, 2013. p.328-332.

ВВЕДЕНИЕ

1. *Мотивация исследования*
2. *Эксперимент БНЛ E949*
 - *Детектор*
 - *Используемые наборы данных*



СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ



Higgs boson

Стандартная Модель (СМ)

- описывает элементарные частицы и их взаимодействия
- сформулирована в 1970-е годы
- предсказания проверены экспериментально
- все частицы обнаружены
- содержит 19 свободных параметров
- экспериментально доказано, что не полна

ПРОБЛЕМЫ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ

Осцилляции нейтрино



Барионная асимметрия Вселенной

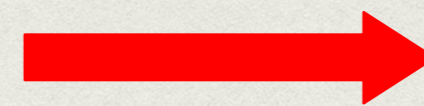


Темная материя и темная энергия



ν MSM: SM + 3 правых нейтрино
 $m_1 \sim 10$ кэВ
 $m_{2,3} \sim 100$ МэВ - 100 ГэВ

T. Asaka and M. Shaposhnikov
Phys. Lett. B620, 17 (2005).



ARE THERE MORE
THAN THREE?
NEUTRINO
FLAVORS?

КАК ИСКАТЬ ТЯЖЕЛЫЕ НЕЙТРИНО

- Распад мезонов



Поиск дополнительных пиков

$$\Gamma(M^+ \rightarrow l^+ \nu_H) = \rho \times \Gamma(M^+ \rightarrow l^+ \nu_l) \times |U_{lH}|^2$$

R.E. Shrock, Phys. Rev. D24, 1232 (1981)

- Распад тяжелых нейтрино

“Ничего” \rightarrow лептоны и адроны

$$\nu_H \rightarrow e^+ e^- \nu_\alpha, \nu_H \rightarrow \mu^\pm e^\mp \nu_\alpha, \nu_H \rightarrow \mu^+ \mu^- \nu_\alpha,$$

$$\nu_H \rightarrow \pi^0 \nu, \pi e, \pi \mu, K e, K \mu, \dots$$

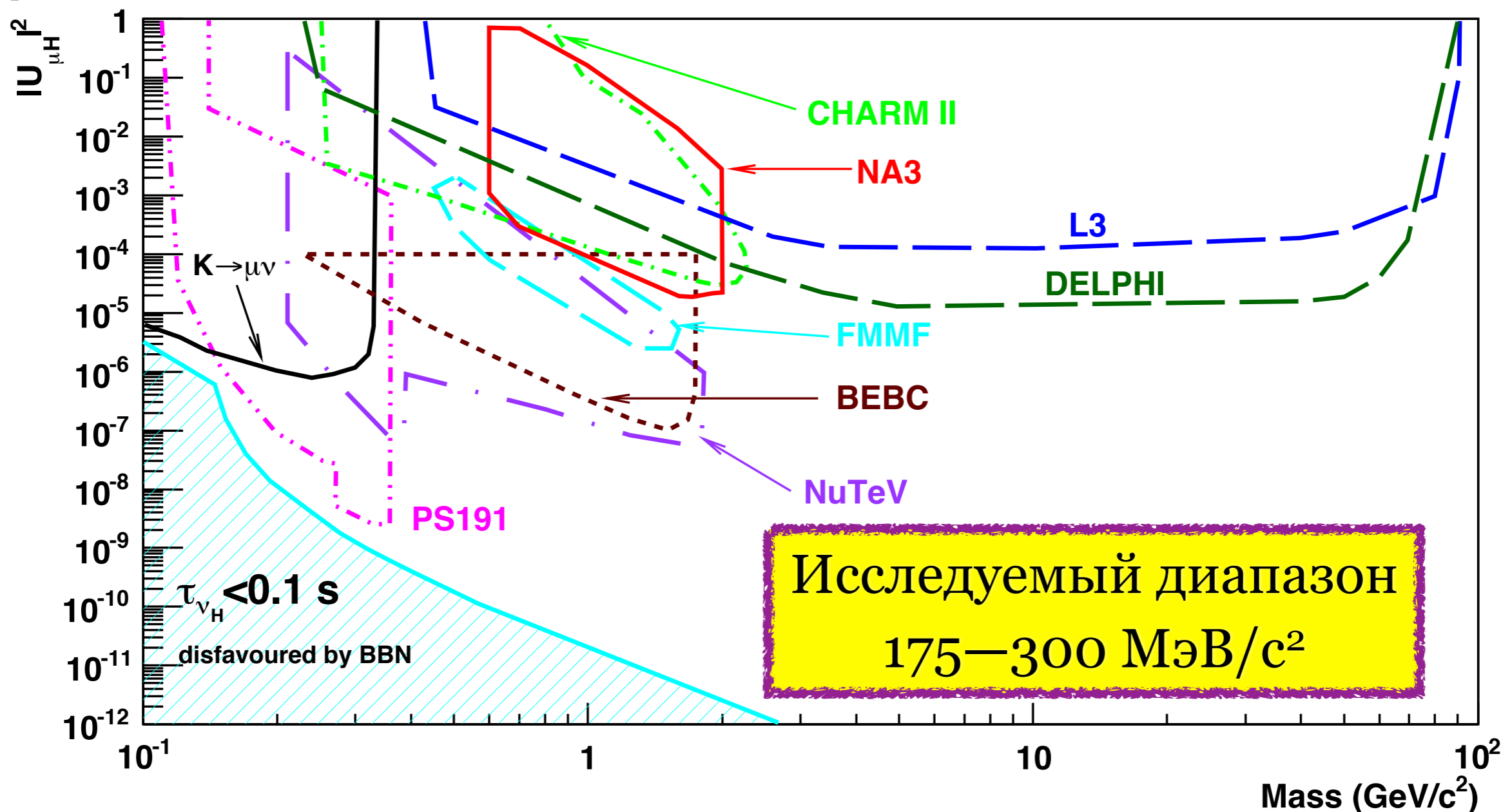
ТЕКУЩИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

ограничения из Belle, BaBar, LHCb для масс до 5 ГэВ/c²

не показаны (Nuclear Physics B Proceedings Supplement 00 (2014) 1–4, см. также arXiv:1502.00477),

ограничение из CMS для масс 50–250 ГэВ/c² также не показано (arXiv:1501.05566)

arXiv:1411.3963



ЭКСПЕРИМЕНТ БНЛ E949



Поиск редкого распада

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$$

Предсказания СМ

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = \\ (7.81^{+0.80}_{-0.71} \pm 0.29) \times 10^{-11}$$

J. Brod, M. Gorbahn, and E. Stamou, Phys. Rev.D83,034030 (2011)

E949+E787

4+3(E787)=7 событий

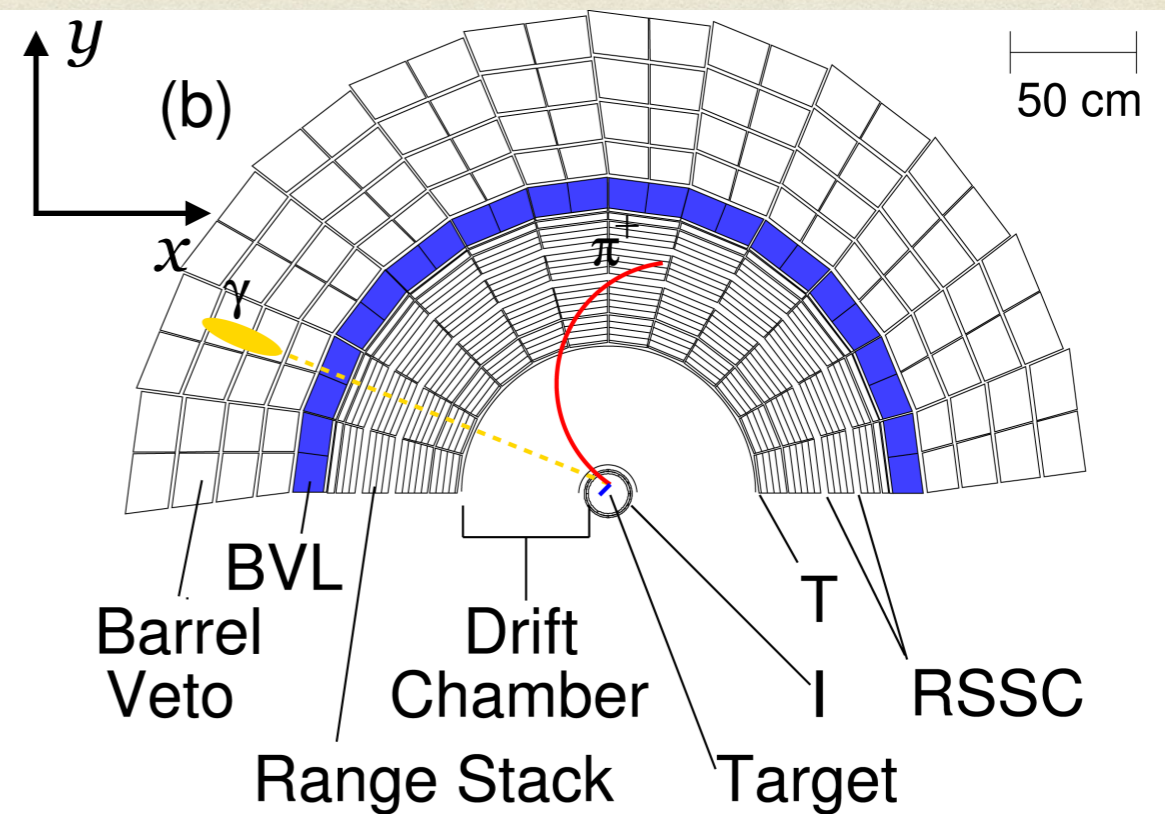
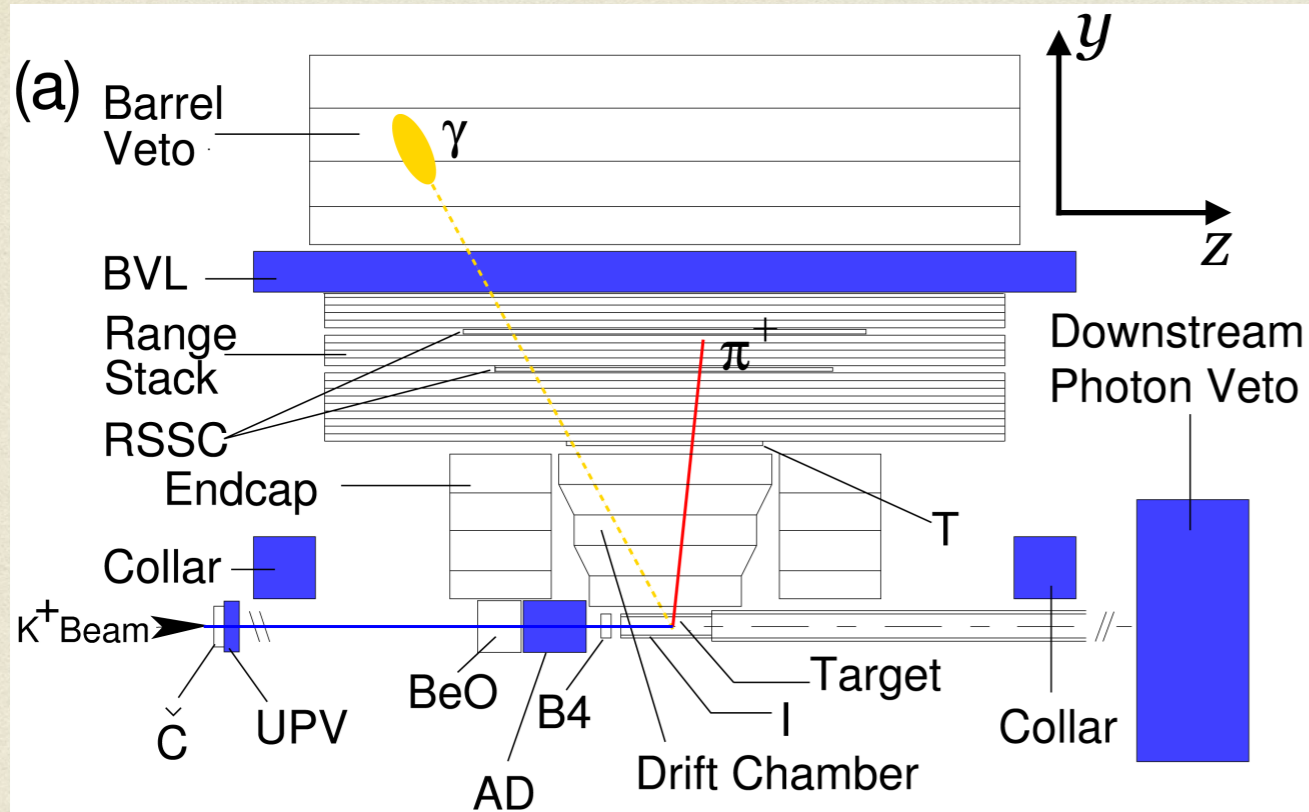


$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) =$$

$$(1.73^{+1.15}_{-1.05}) \times 10^{-10}$$

Phys. Rev. D79, 092004 (2009)

ДЕТЕКТОР E949



- Пучок каонов с импульсом 710 МэВ/с идентифицируется черенковским счетчиком замедляется
- Каоны останавливаются и распадаются в активной сцинтилляционной мишени

- Импульс вторичных заряженных частиц измеряется в дрейфовой камере, энергия и длина пробега измеряются в детекторе пробега
- Весь детектор окружен вето системой фотонов

НАБОРЫ ДАННЫХ



♦ Основной триггер



- ☑ Плюсы — большое число остановленных каонов, равное 1.70×10^{12} , искомый распад $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ похож на распад $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$: один заряженный трек и никакой другой активности в детекторе



- ☐ Минусы — оптимизирован для регистрации пионов от распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$, подавление мюонов

♦ Дополнительные триггера



- ☑ Плюсы — нет подавления мюонов



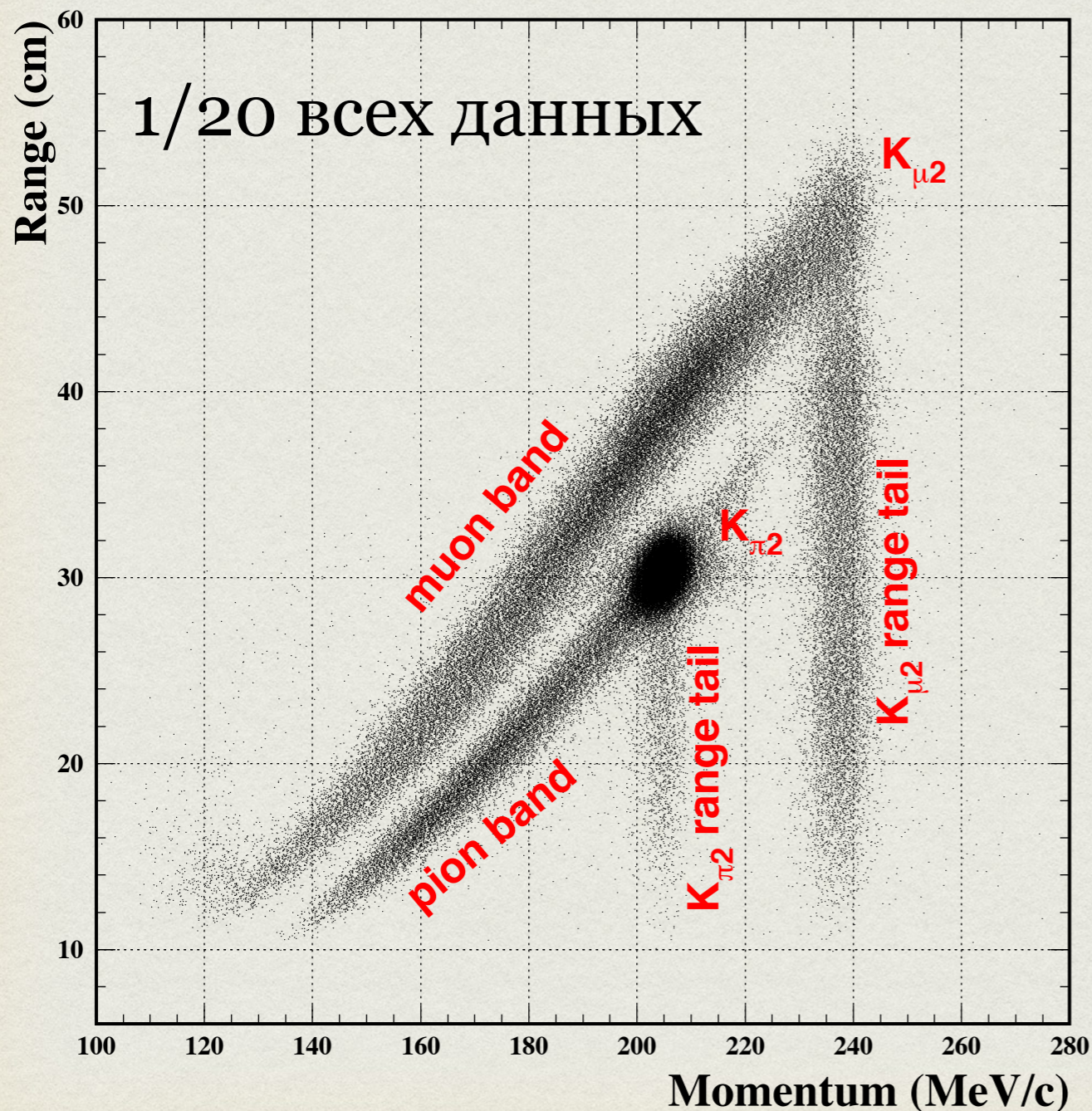
- ☐ Минусы — намного меньшее число остановленных каонов ($\sim 10^7$)

Использовались для калибровки детектора, проверки качества данных, измерения акцептанса установки в распаду $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$.

ОСНОВНОЙ ТРИГГЕР

- Идентификация каона до попадания в мишень
- Временная задержка между распадом каона и идентификацией в черенковском счетчике 1.5 нс для подавления распадов на лету
- Рабочий объем установки (Fid&Range): заряженный трек должен зажечь первые два слоя детектора пробега, находящиеся в одном секторе, и долететь как минимум до шестого слоя (подавление коротких треков от многочастичных распадов)
- Заряженный трек не должен долететь до последнего слоя детектора пробега (подавление мюонов от $K_{\mu 2}$ распада) (L19)
- Дополнительное подавление длинных треков, которые прошли предыдущее условие (RR): учитывает число зажженных волокон в мишени и координату z заряженного трека в слоях 3, 11 и 12 детектора пробега, а также слой остановки
- Идентификация пиона онлайн (L1n): нахождение цепочки распада $\pi^+ \rightarrow \mu^+$ в счетчике остановки заряженного трека
- Фотонное вето, подавление многотрековых событий в детекторе пробега

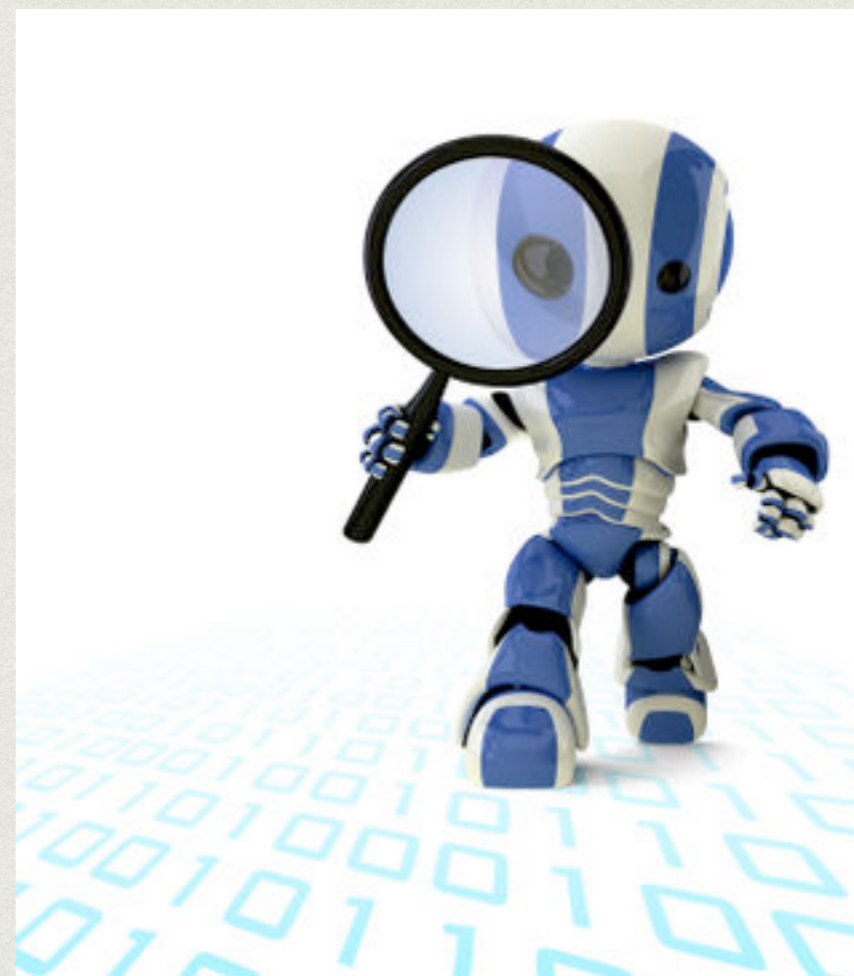
СОБЫТИЯ, ПРОШЕДШИЕ ТРИГГЕР



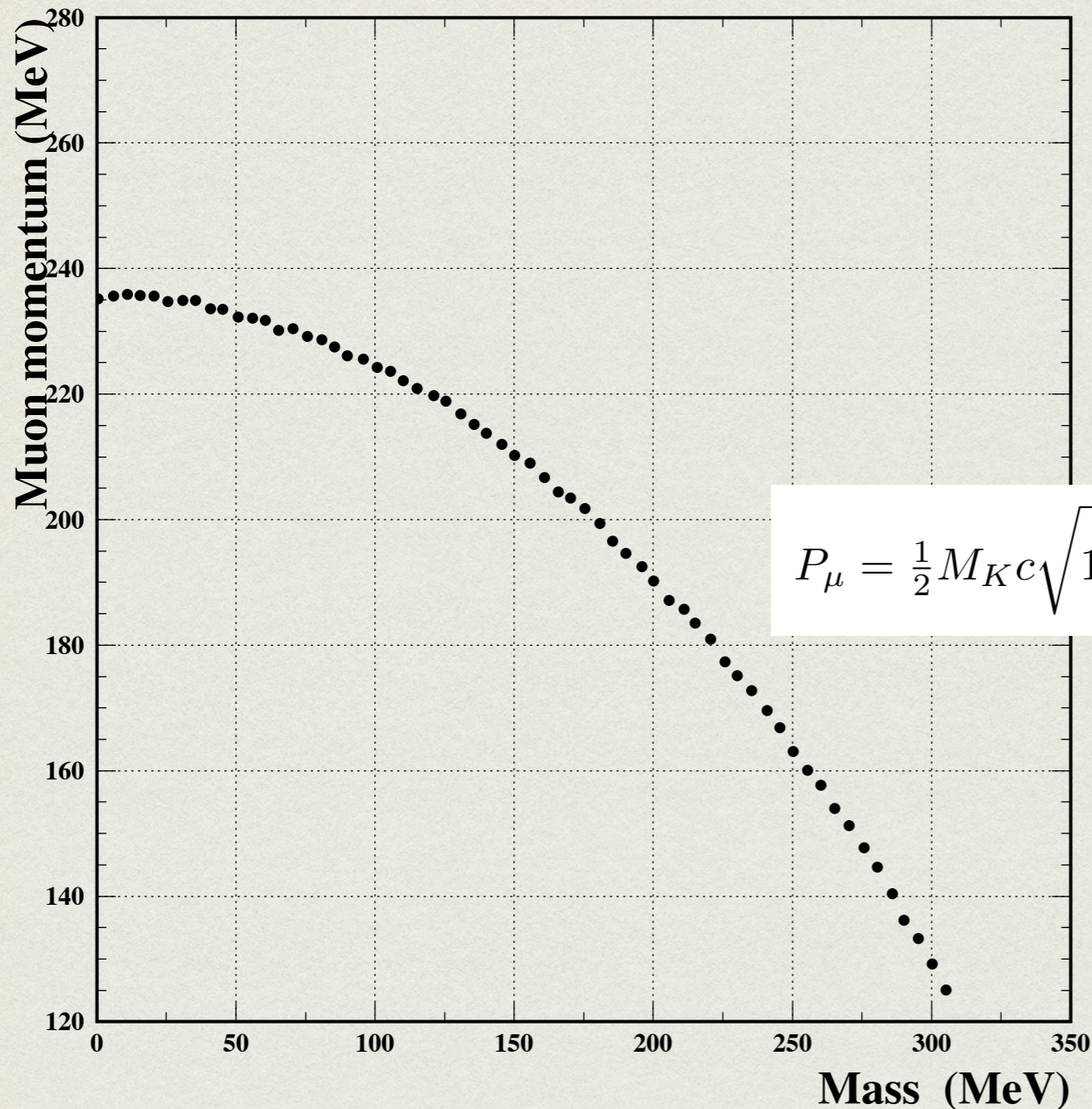
- Каждое 20-ое событие из всех событий, прошедших основной триггер, выбиралось, чтобы сформировать показанный набор
- Мюонный след: в основном мюоны от $K_{\mu\nu\gamma}$ и $K_{\mu 3}$ распадов
- Пионный след: пионы от $K_{\pi 2\gamma}$ распада и от $K_{\pi 2}$ распада, когда пионы рассеиваются в мишени или детекторе пробега, а также пионы из пучка

АНАЛИЗ ДАННЫХ

1. *Отбор мюонных событий*
2. *Измерение акцептанса*
3. *Изучение 1/20 всех данных*
 - *Проверка определения акцептанса*
 - *Определение систематических ошибок*
 - *Изучение фоновых процессов*
4. *Зависимость разрешения детектора от импульса мюона*
5. *Метод поиска пиков*



ИДЕЯ АНАЛИЗА



$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ — двухчастичный распад, поэтому импульс вылетающего мюона однозначно определяется массой тяжелого нейтрино

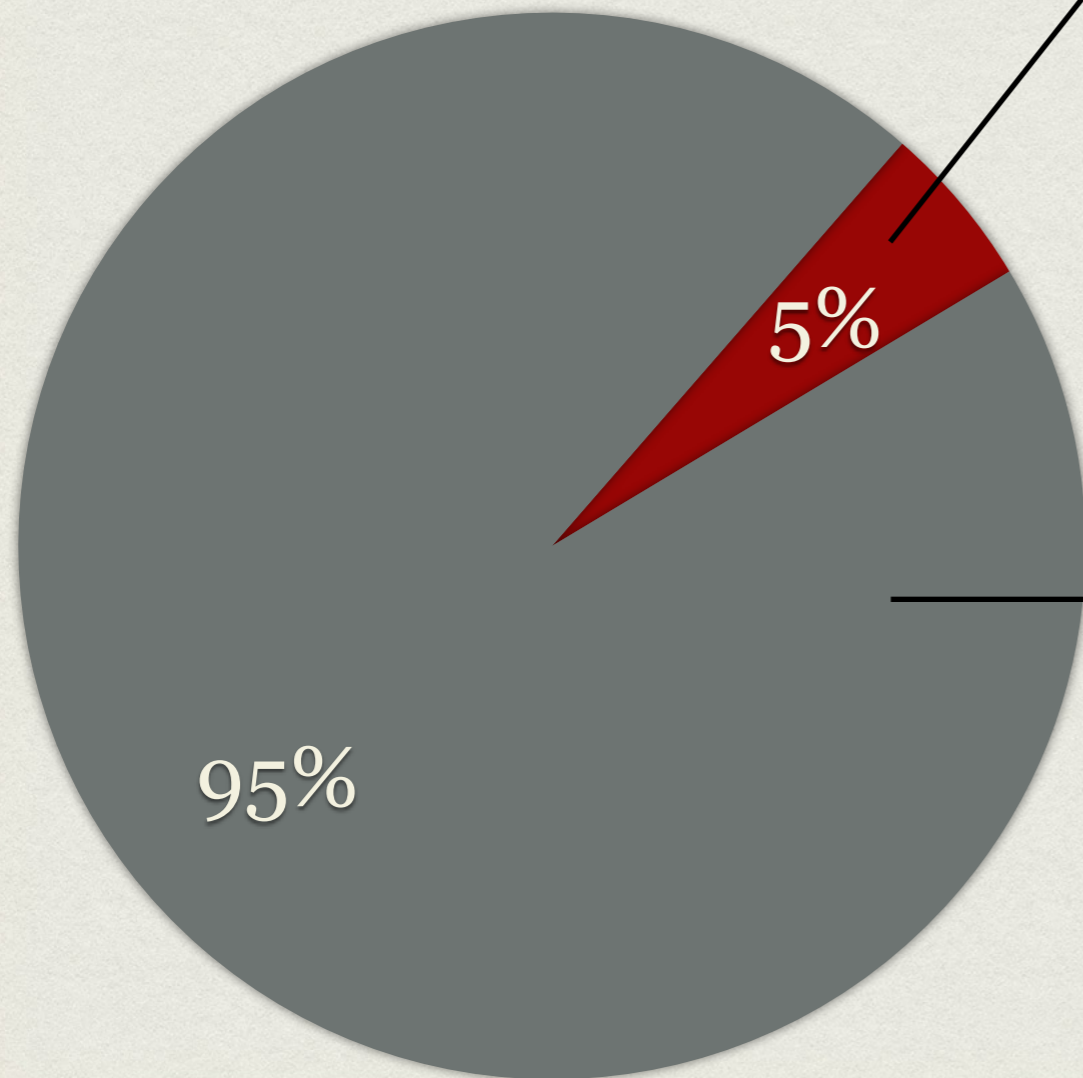
$$P_\mu = \frac{1}{2} M_K c \sqrt{1 + \left(\frac{m_\mu^2}{M_K^2}\right)^2 + \left(\frac{m_{\nu_H}^2}{M_K^2}\right)^2 - 2 \left(\frac{m_\mu^2}{M_K^2} + \frac{m_{\nu_H}^2}{M_K^2} + \frac{m_\mu^2}{M_K^2} \frac{m_{\nu_H}^2}{M_K^2}\right)}$$



Поиск пиков в спектре импульсов мюонов

СТРУКТУРА АНАЛИЗА

Данные, прошедшие основной триггер



- Проверка определения аксептанса
- Определение систематических ошибок
- Изучение формы фона

Используется только для получения конечного результата

ОТБОР МЮОННЫХ СОБЫТИЙ

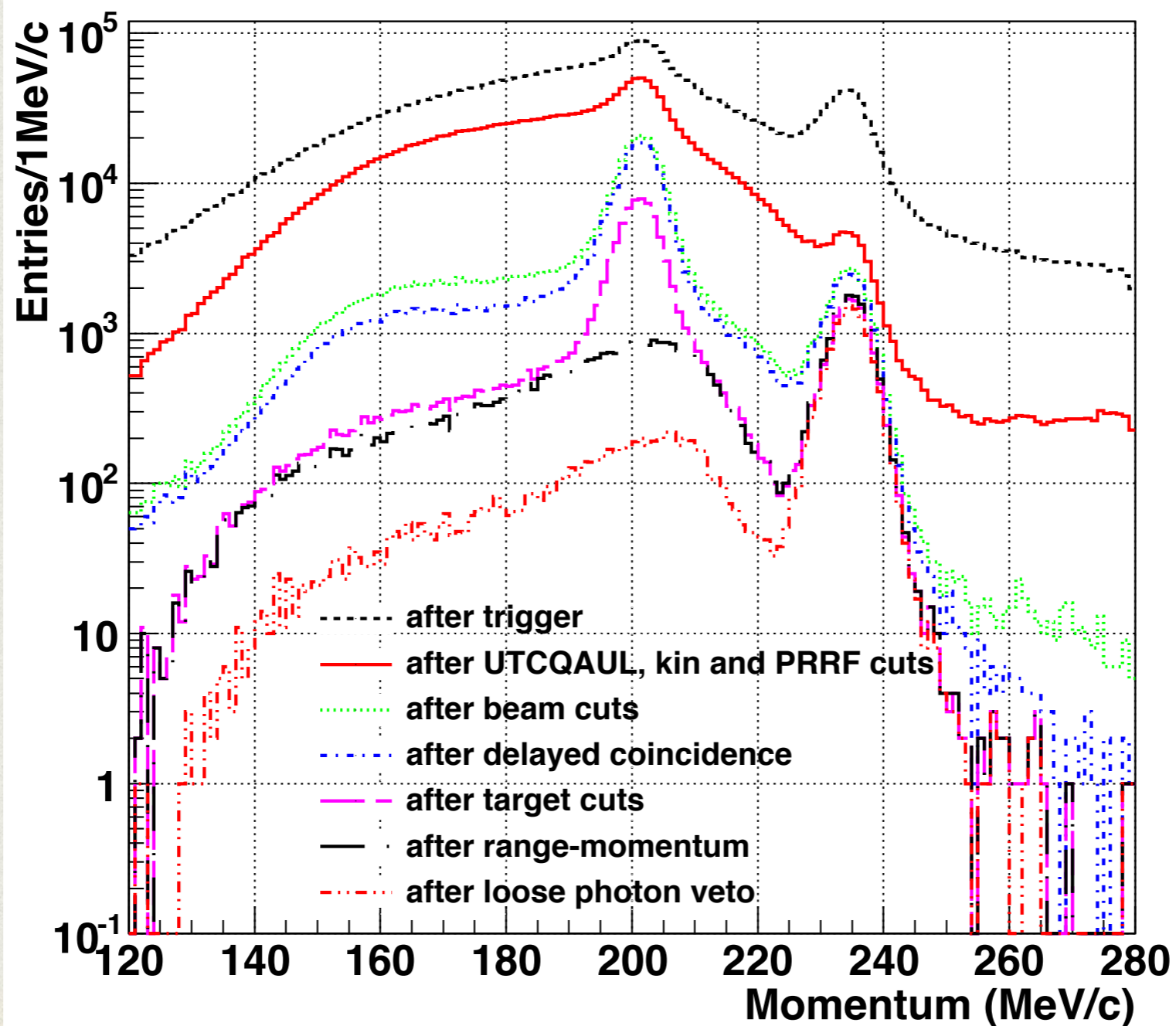
1. Реконструкция заряженного трека в дрейфовой камере (UTCQUAL)
2. Кинематические критерии отбора (k_{in}): заряженный трек должен попасть в рабочий объем детектора, зависящий от слоя остановки
3. Реконструкция заряженного трека в детекторе пробега и соответствие с треком в дрейфовой камере (PRRF): подавление рассеяния в детекторе пробега
4. Критерии отбора в пучке (BEAM): идентификация каона и устранение возможности попадания в мишень двух частиц одновременно

ОТБОР МЮОННЫХ СОБЫТИЙ

5. Временная задержка (DELTA): подавление распадов каонов на лету
6. Критерии отбора в мишени (TARGET): данная группа критериев отбора позволяет выбрать качественный одиночный заряженный трек в мишени и устранить возможное рассеяние
7. Соответствие импульс-пробег (RNGMOM): вычисляется отклонение измеренного пробега заряженного трека в детекторе пробега от ожидаемой величины, полагая, что заряженный трек — это пион. В данном анализе это условие было оптимизировано для идентификации мюона
8. Фотонное вето (PV): любая активность в детекторе, совпадающая по времени с заряженным треком, запрещена
 - Слабое: для проверки определения аксептанса и изучения формы фона
 - Сильное: для получения конечного результата

ОТБОР МЮОННЫХ СОБЫТИЙ

1/20 всех данных



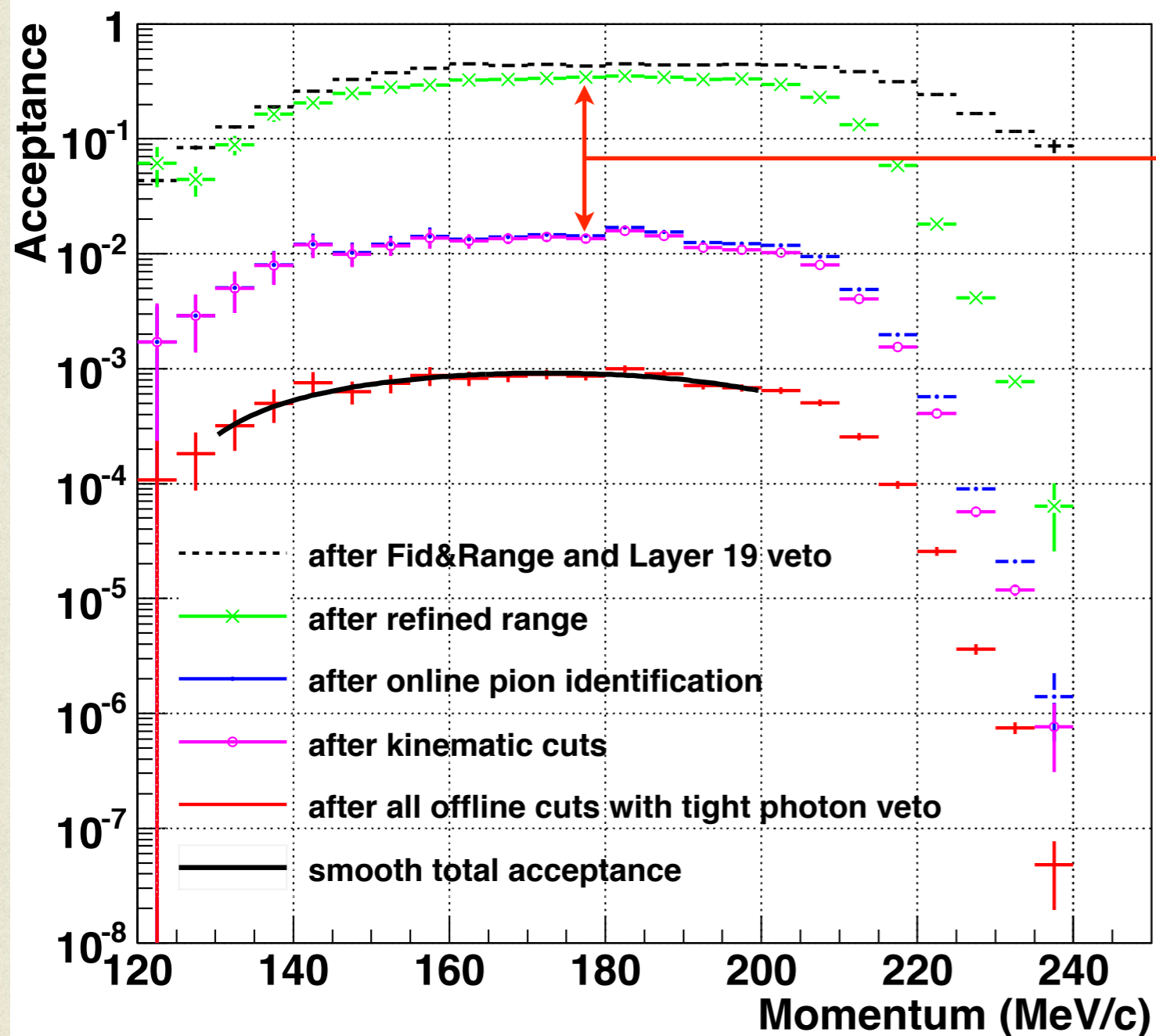
ИЗМЕРЕНИЕ АКСЕПТАНСА

Монте Карло моделирование

Roles		$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$
Acceptance measurement for the $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ decay	trigger			✓
	L1n		✓	
	Refined Range		✓	
	kin			✓
	beam&target	✓		
	RNGMOM		✓	
	PV	✓		
Background study			✓	
Resolution		✓		✓

Для определения аксептанса использовался в основном $K_{\mu 2}$ распад, однако мюоны от этого распада имеют определенный импульс. Для измерения зависимости некоторых критериев отбора от импульса мюона использовался $K_{\mu \nu \gamma}$ распад.

ИЗМЕРЕНИЕ АКСЕПТАНСА



Наибольшая
неуменьшаемая потеря
аксептанса из-за
онлайн идентификации
пиона (~ 20)

Чувствительность
установки к распаду
 $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ в отсутствии
фоновых событий:

$$S.E.S = \frac{1}{K Blive \times Acc} = 7.35 \times 10^{-10}$$

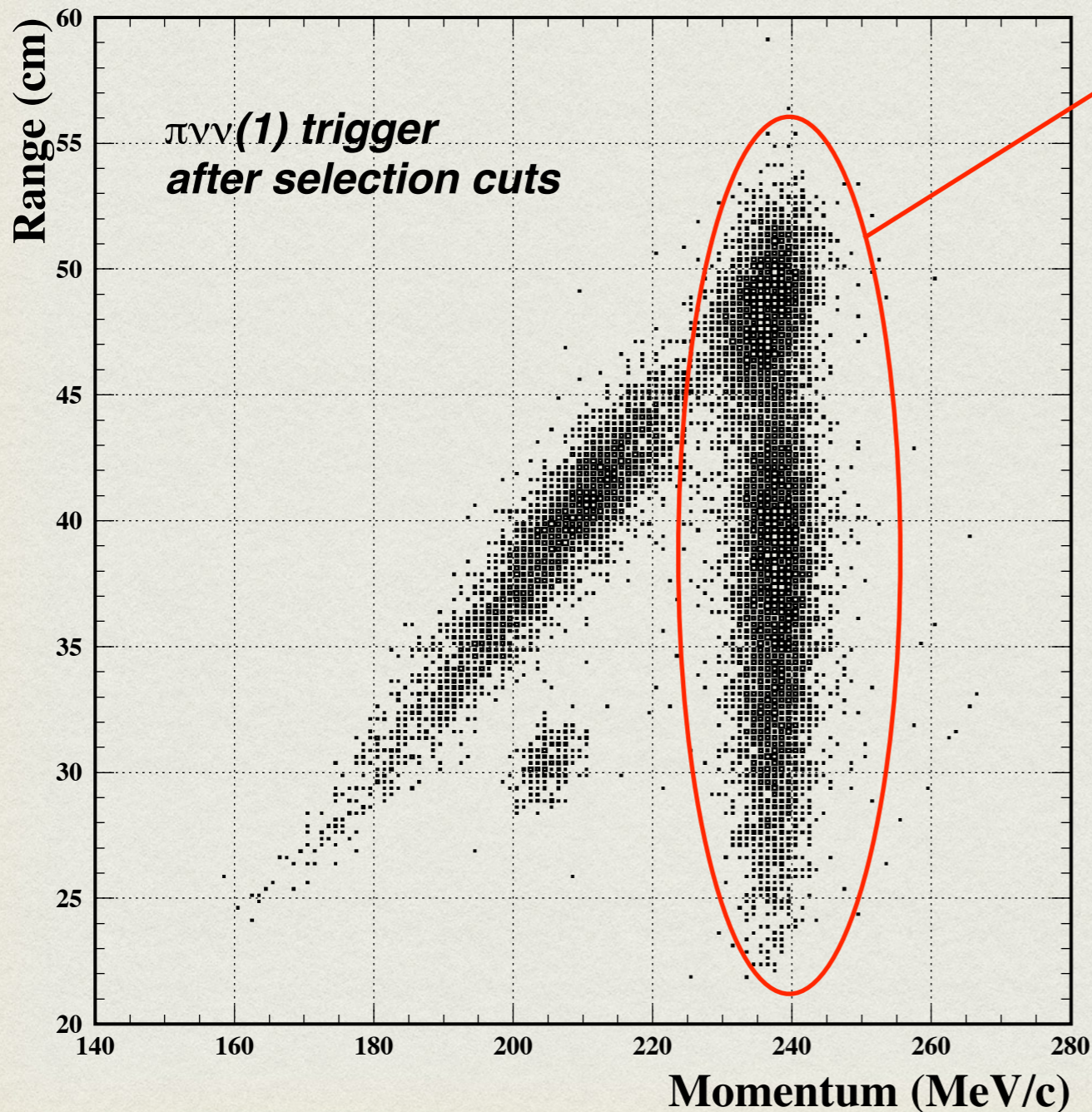
ПРОВЕРКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКСЕПТАНСА

- * Измерение вероятности распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ в основном триггере, используя 1/20 всех данных
- * Измерение вероятности распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$ в интервале импульсов $140 < p_\mu < 200$ МэВ/с в основном триггере, используя 1/20 всех данных

ИЗМЕРЕНИЕ АКСЕПТАНСА

Acceptance factors	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
f_s	K π 2(1)		
A_{PRRF}	π_{scat}		
$A_{UTCQUAL}$			
$\epsilon_{T\bullet 2}$	Kbeam		
$A_{Fid\&Range}$	MC		
$A_{Kinematic}$			
$A_{19_{ct}}$			
$A_{RefinedRange}$	K π 2(1)		K π 2(1)
$A_{\pi \rightarrow \mu}$			
A_{RNGMOM}			not applied
$A_{Beam\&Target}$	K μ 2		
A_{DELC}			
A_{PV}	Loose	not applied	MC
	Tight	K μ 2	not applied

$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ РАСПАД



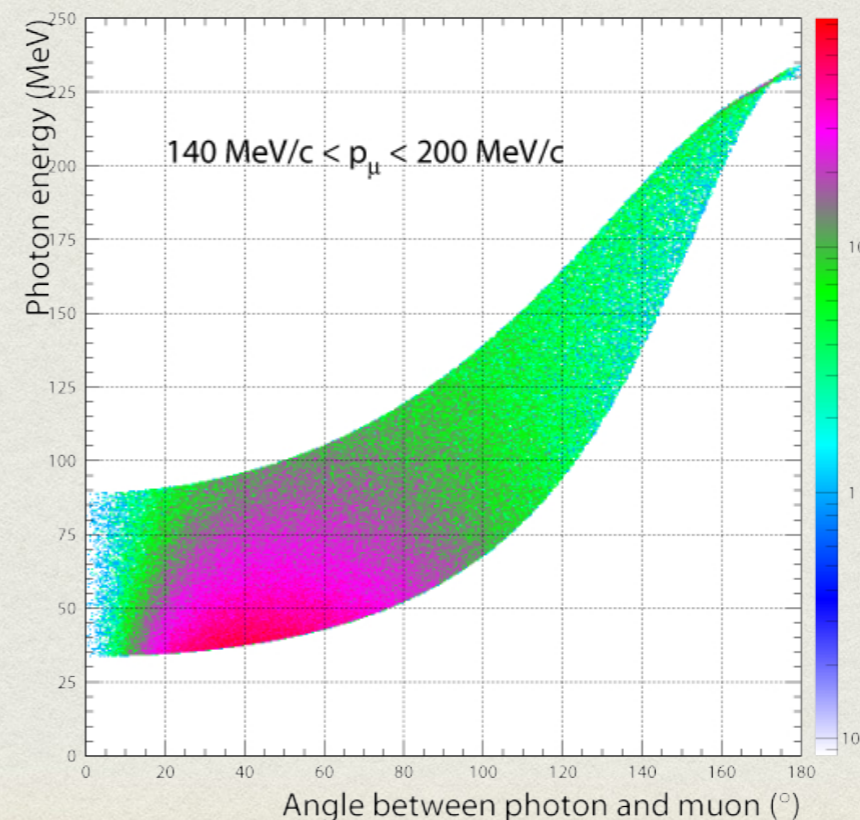
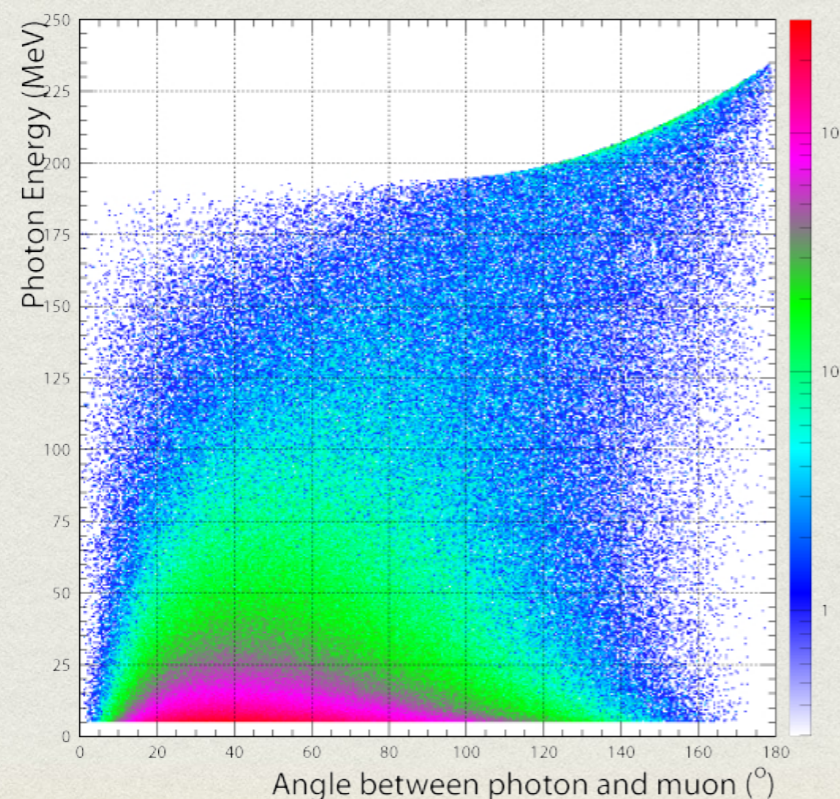
Искомые события
Акцептанс некоторых
критериев отбора (L19, RR,
L1n, PRRF) должен быть
скорректирован для
данного диапазона
импульса мюона

$$BR(K_{\mu 2}) = 0.54 \pm 0.15$$
$$BR^{PDG}(K_{\mu 2}) = 0.6355 \pm 0.0011$$

$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$ РАСПАД

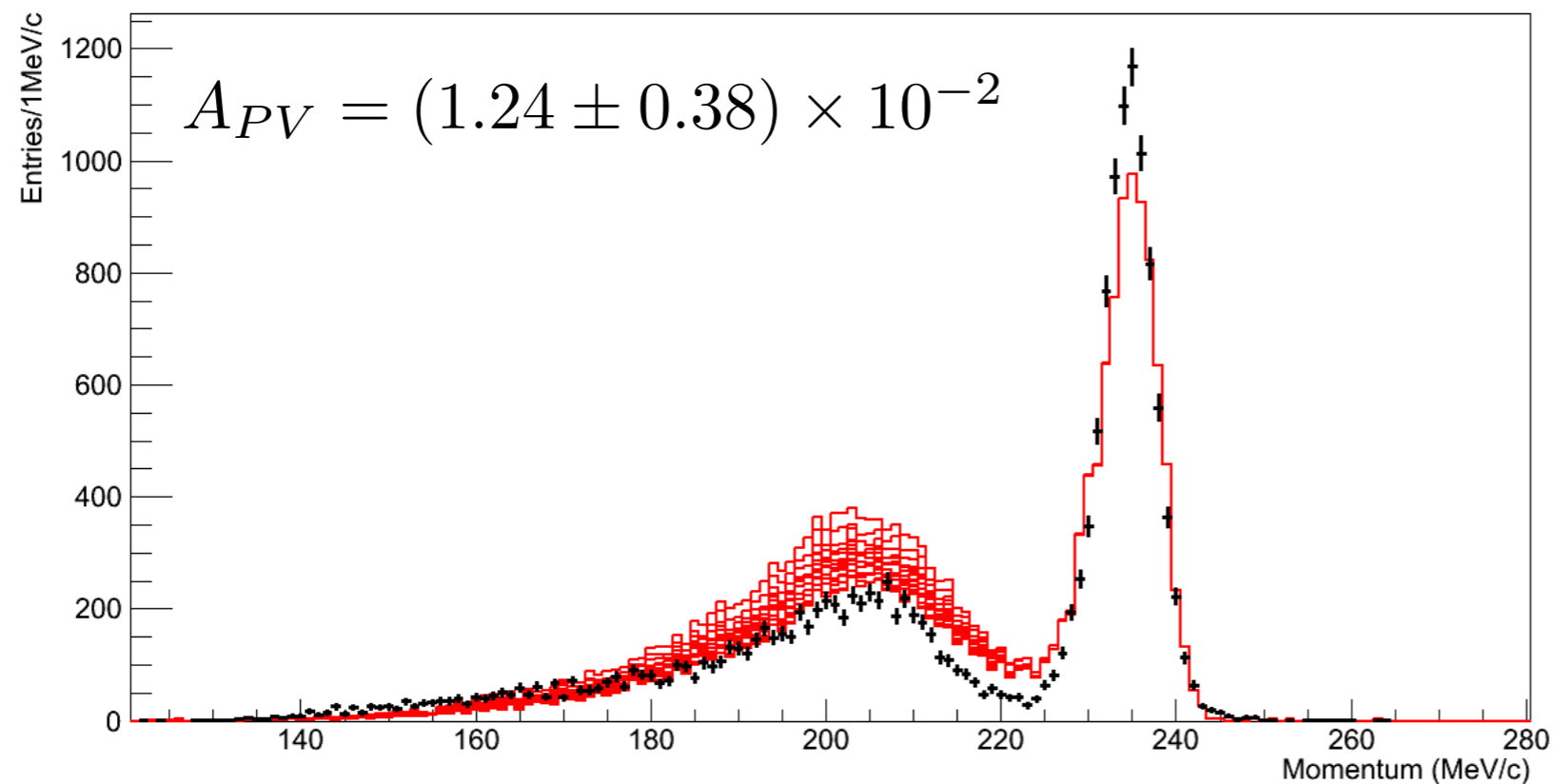
Измерение вероятности распада в диапазоне импульсов мюонов $140 < p_\mu < 200$ МэВ/с. Эффективности всех критериев отбора уже измерены, кроме фотонного вето.

Используем Монте Карло моделирование и таблицу неэффективности регистрации одного фотона в детекторе.



$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$ РАСПАД

Моделирование шума не встроено в Монте Карло, поэтому пороги фотонных детекторов для смоделированного распада должны быть меньше порогов, использующихся в эксперименте.



Варьируем пороги от нуля до номинальных значений. Акцептанс фотонного вето — средний акцептанс красных гистограмм

$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$ РАСПАД

Измеренная вероятность распада в диапазоне импульсов мюонов $140 < p_\mu < 200$ МэВ/с:

$$BR(K_{\mu\nu\gamma}) = (1.3 \pm 0.4) \times 10^{-3}$$

Ошибку измерения принимаем за систематическую ошибку определения акцептанса распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$

$$BR^{PDG}(K_{\mu\nu\gamma}) = (6.2 \pm 0.8) \times 10^{-3}, p_\mu < 231.5 \text{ МэВ/с}$$

Используем Монте Карло моделирование для определения вероятности в исследуемой области:

$$BR^{PDG}(K_{\mu\nu\gamma}) = (1.4 \pm 0.2) \times 10^{-3}$$

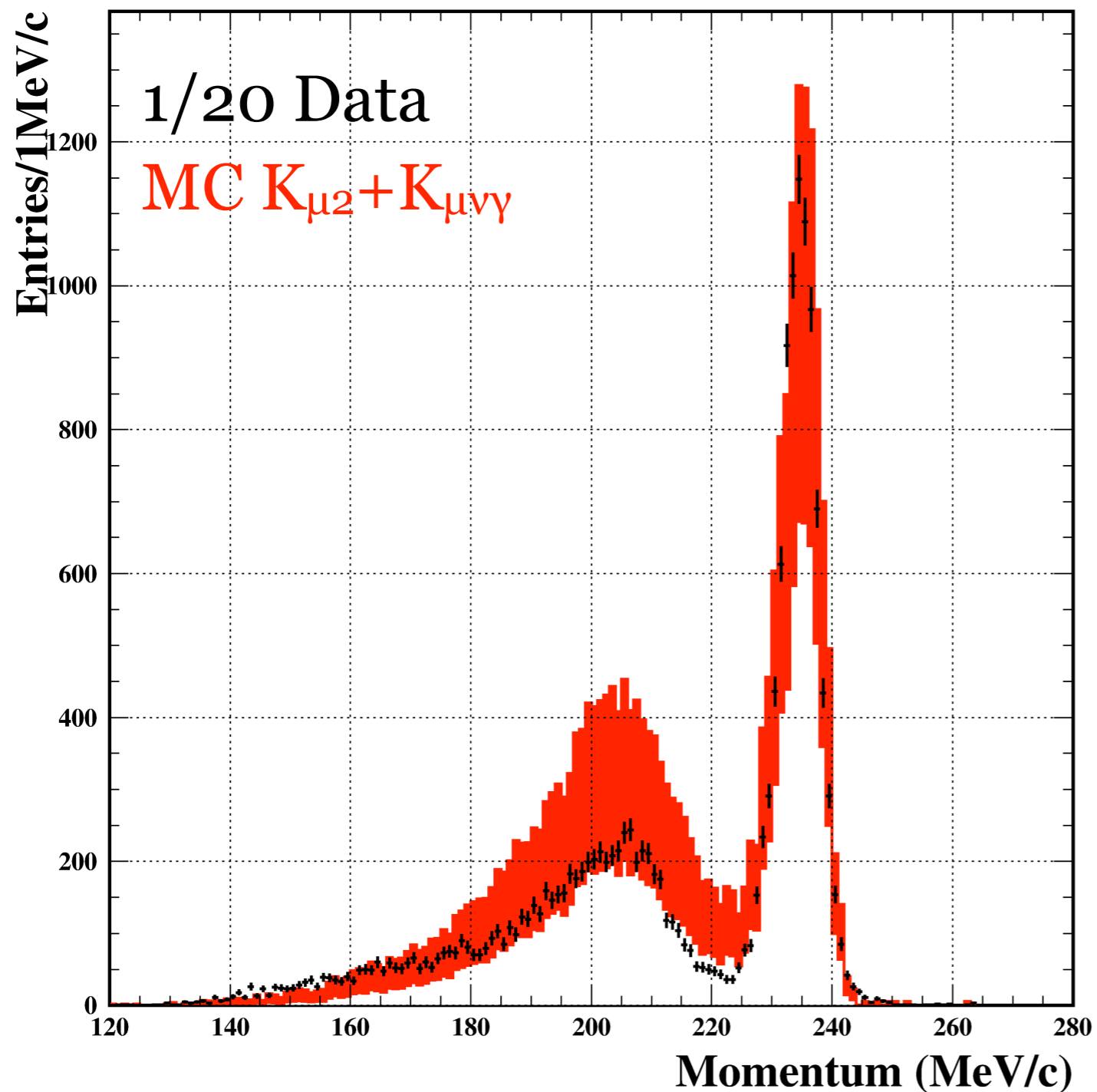
ФОНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Process	Trigger+cuts rej	BR	Total rejection
$K_{\mu\nu\gamma}$	$\sim 10^4$	6.2×10^{-3}	$\sim 10^7$
$K_{\mu 3}$	$\sim 10^7$	3.35×10^{-2}	$\sim 10^9$
Only $\pi\nu\nu(1+2)$ trigger			
$K_{\pi 2\gamma}$	$\sim 5 \times 10^4$	2.75×10^{-4}	$\sim 2 \times 10^9$

Используем Монте Карло моделирование. Фон от распада $K_{\pi 2\gamma}$ можно не учитывать из-за наличия трех фотонов в конечном состоянии и высокого подавления пионов путем применения RNGMOM.

Распад $K_{\mu\nu\gamma}$ вносит основной вклад в фоновые процессы

ФОРМА ФОНА

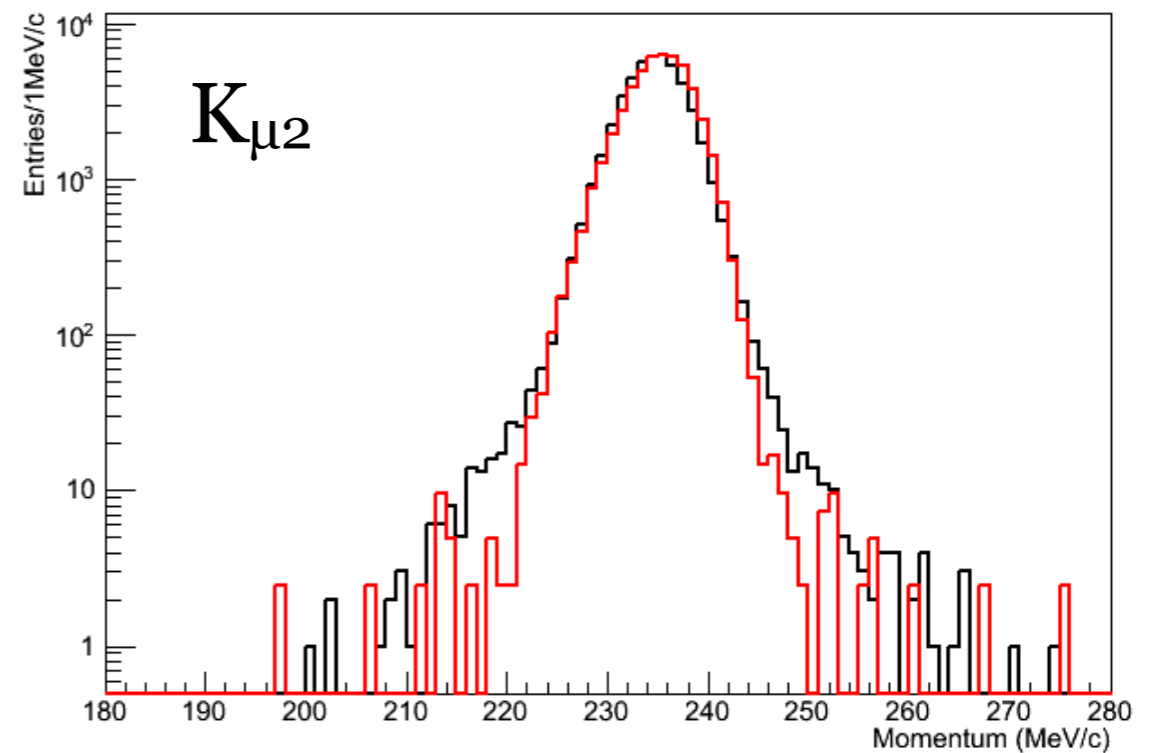
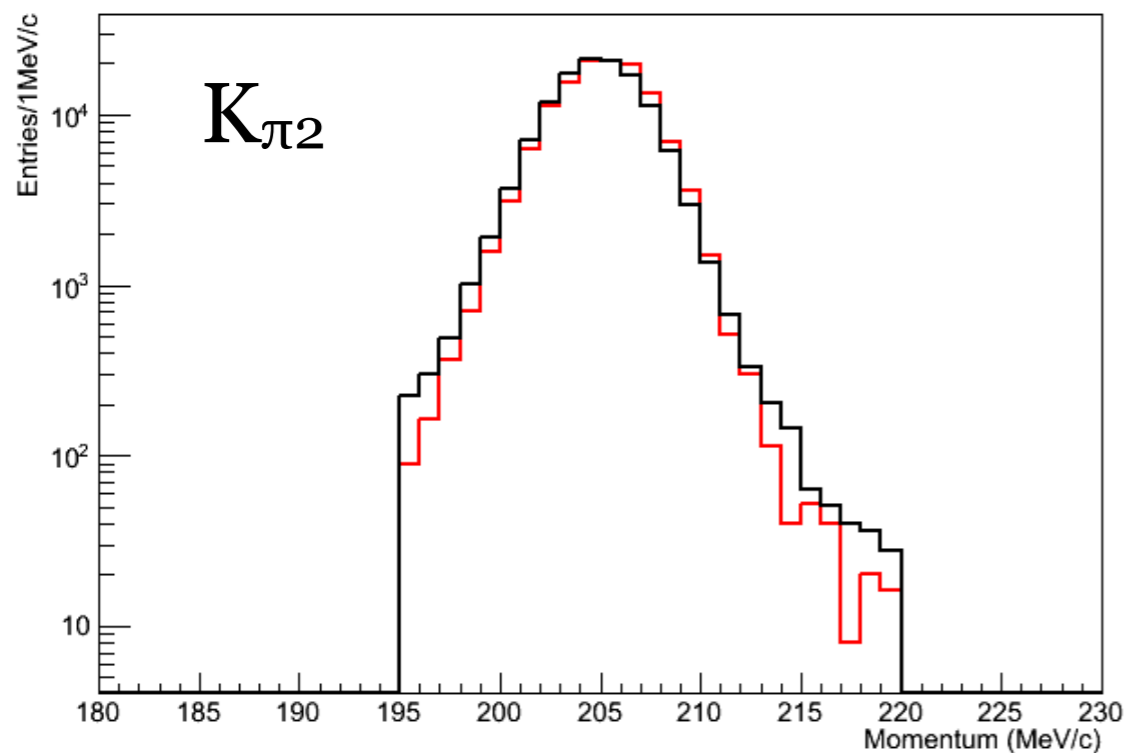


$$k_{K_{\mu 2}} = \frac{(KBlive)_{1/20}}{N_{sim, K_{\mu 2}}} \times \frac{A_{K_{\mu 2}}^{Exp}}{A_{K_{\mu 2}}^{MC}} \times BR(K_{\mu 2})$$

$$k_{K_{\mu \nu \gamma}} = \frac{(KBlive)_{1/20}}{N_{sim, K_{\mu \nu \gamma}}^{140 < p < 200}} \times \frac{A_{K_{\mu \nu \gamma}}^{Exp}}{A_{K_{\mu \nu \gamma}}^{MC}} \times BR(K_{\mu \nu \gamma})$$

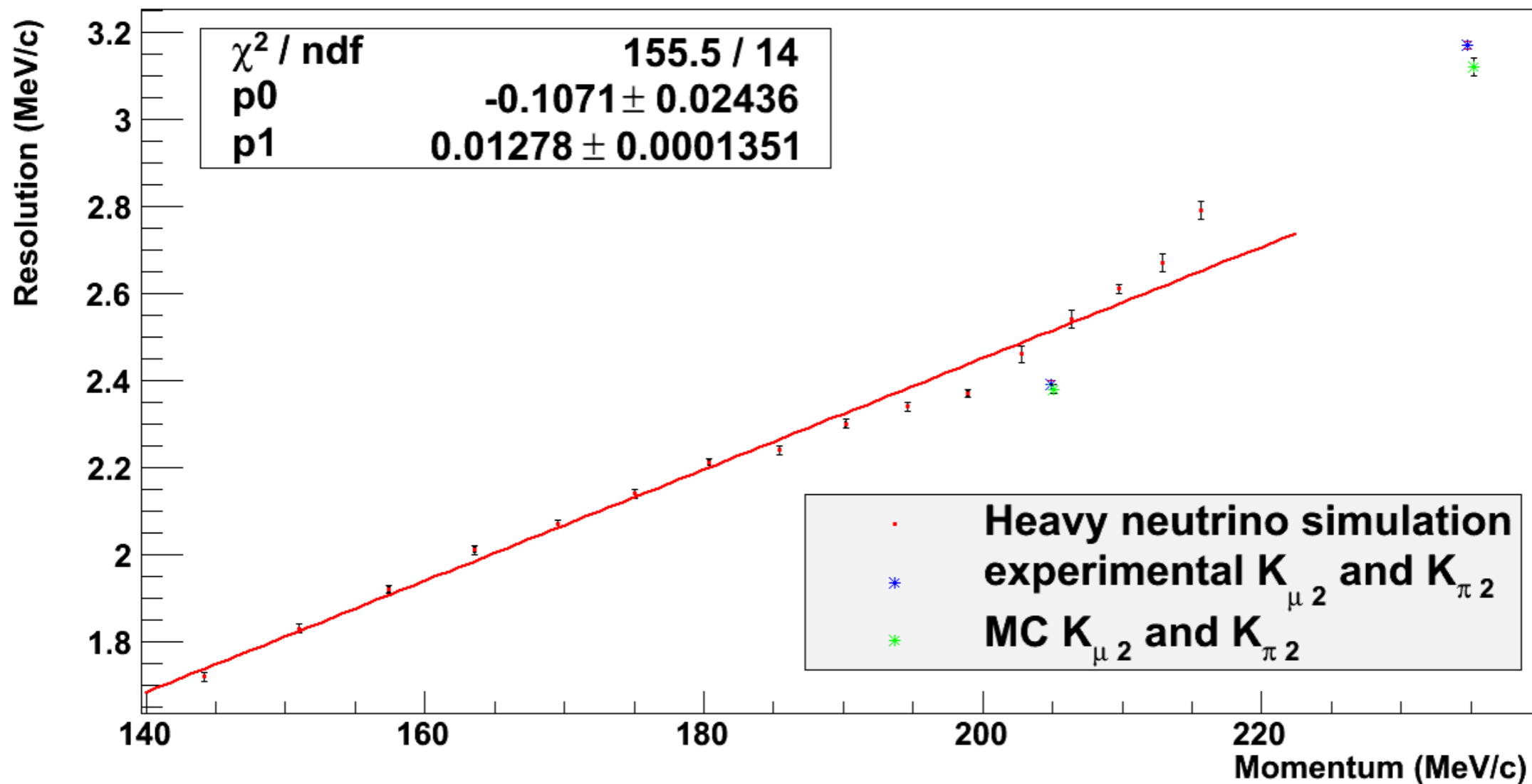
Монте Карло не является лучшим фитом данных, однако, мы не будем использовать смоделированную форму фона в дальнейшем анализе. Единственное сделанное предположение, что фон является гладким.

РАЗРЕШЕНИЕ ДЕТЕКТОРА ПО ИМПУЛЬСУ



Монте Карло моделирование и данные совпадают, поэтому мы можем использовать смоделированный $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ распад для определения зависимости импульсного разрешения детектора от импульса вылетающего мюона

РАЗРЕШЕНИЕ ДЕТЕКТОРА ПО ИМПУЛЬСУ



$$\sigma(p)(MeV/c) = (-0.1071 + 0.01278 \times p(MeV/c)) \pm 0.14 \pm 0.05$$

МЕТОД ПОИСКА ПИКОВ

- Точная форма фона неизвестна, поэтому мы будем определять эту форму из данных, предполагая, что фон должен быть гладким
- Определяем форму фона локально: выбираем область $\pm 9\sigma$ (σ — разрешение детектора) вокруг исследуемой точки импульса мюона и фитируем полиномом второй степени
- Форма сигнала Гаусс с известной шириной (разрешение детектора)
- Используем статистический подход, использовавшийся при поиске бозона Хиггса в эксперименте ATLAS (Eur.Phys.J.C71:1554,2011)

МЕТОД ПОИСКА ПИКОВ

Используем следующую функцию правдоподобия

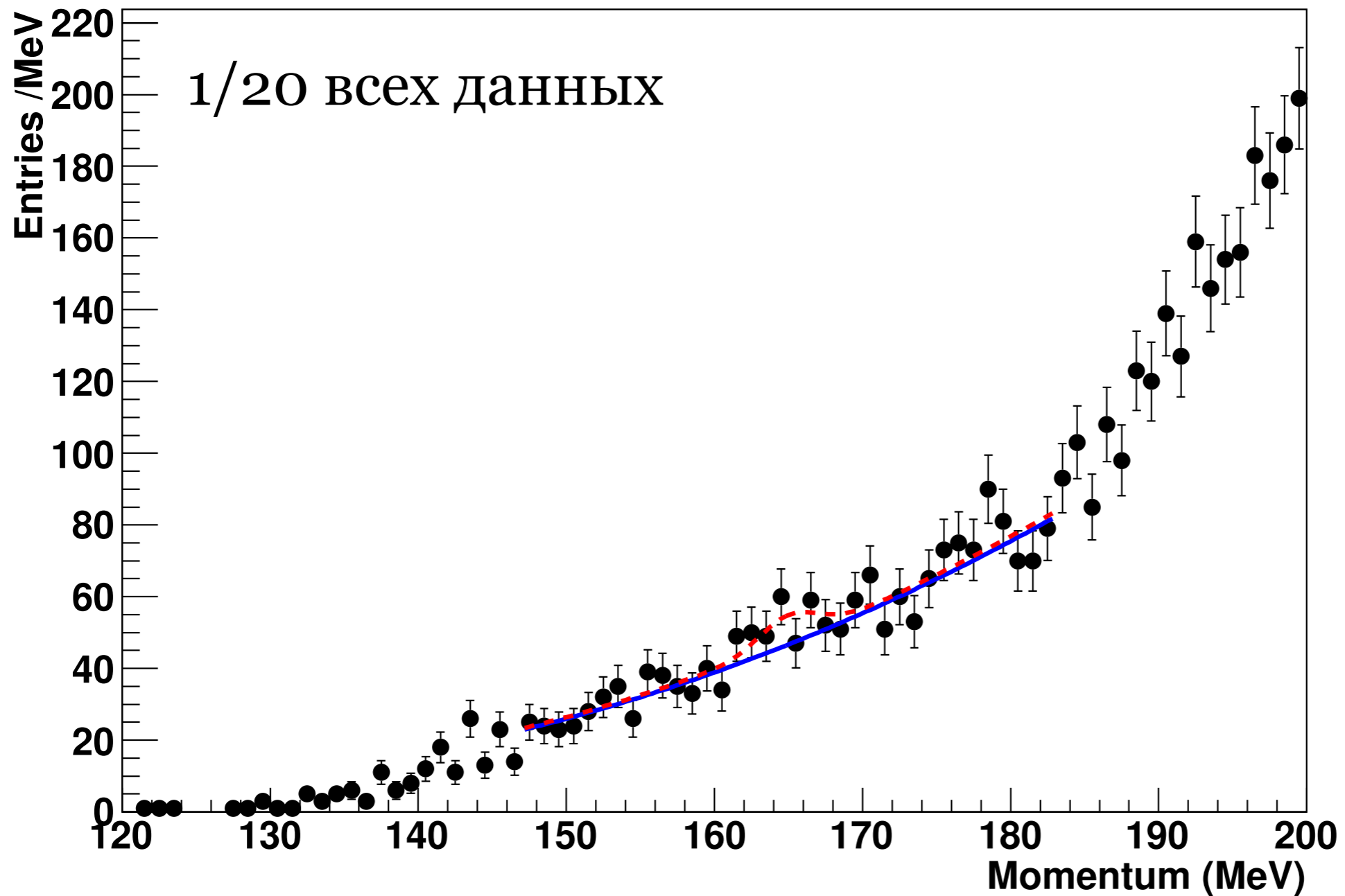
$$L(\mu, \theta) = \left\{ \prod_{i=1}^{N_{bin}} \frac{(\mu \cdot \epsilon s_i + \beta b_i)^{n_i}}{n_i!} e^{-(\mu \cdot \epsilon s_i + \beta b_i)} \right\} \\ \times Gauss(\epsilon; \epsilon_{peak}, \sigma_{\epsilon_{peak}}),$$

где N_{bin} — число бинов в исследуемой области; s_i и b_i — вероятности распределения сигнала и фона соответственно в i -ом бине; n_i — полное число наблюдаемых событий в i -ом бине; β — параметр фона, одинаковый во всех исследуемых бинах; параметр ϵ добавлен для того, чтобы учесть полный аксептанс к искомому распаду при помощи распределения Гаусса со средним значением ϵ_{peak} и стандартным отклонением $\sigma_{\epsilon_{peak}}$; μ — параметр сигнала (обычно число событий в искомом пике, в нашем случае число событий, деленное на аксептанс к распаду $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ в исследуемой точке)

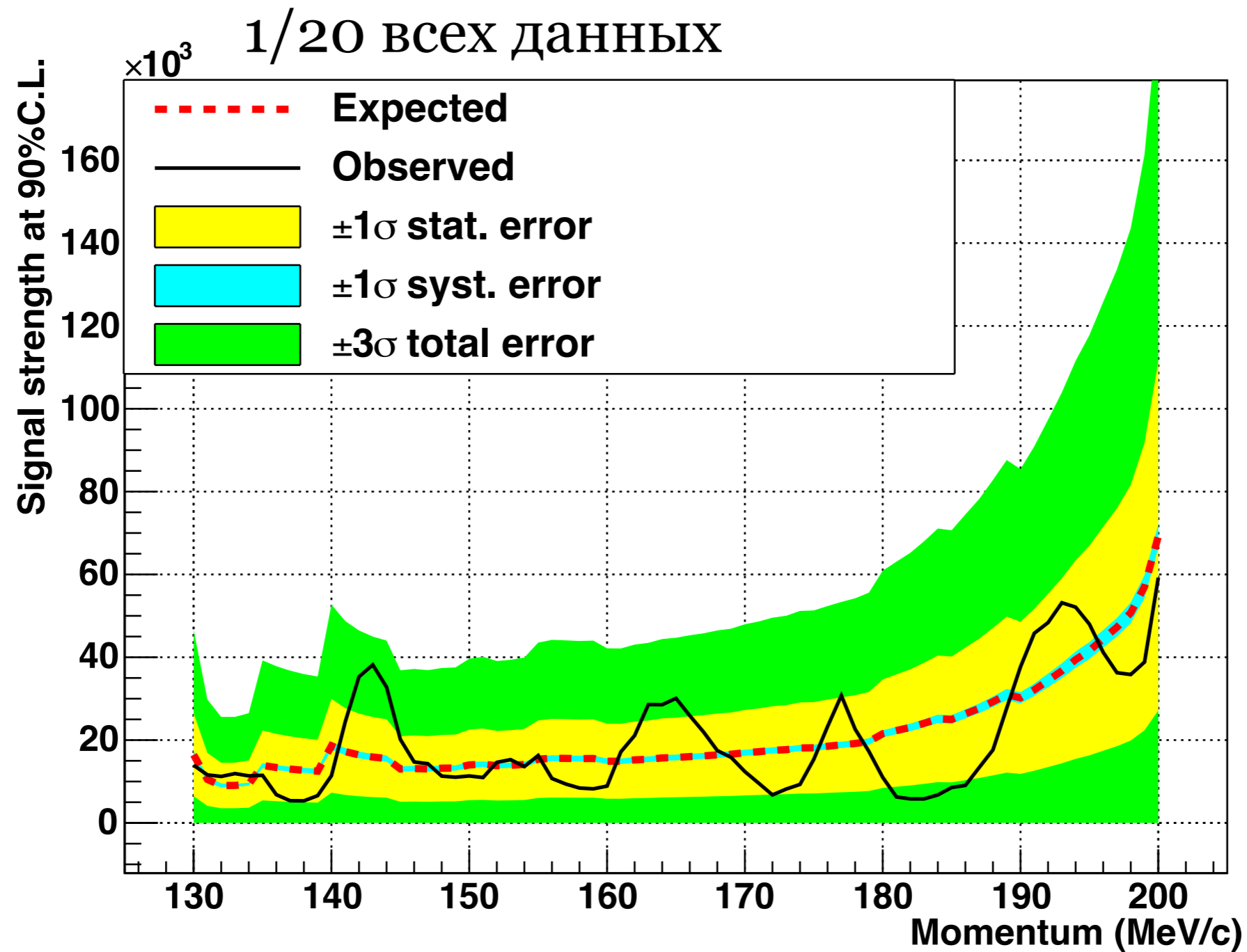
МЕТОД ПОИСКА ПИКОВ

- Используем “азимовский” (искусственный) набор данных (только фон, сигнала нет), сгенерированный по форме фона, полученной из данных, чтобы вычислить ожидаемый верхний предел на скорректированное число событий в искомом пике при доверительном интервале 90%
- Используем такой же метод, но с экспериментальными данными, чтобы вычислить наблюдаемый верхний предел на скорректированное число событий в искомом пике при доверительном интервале 90%

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА



ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА



РЕЗУЛЬТАТЫ

- 1. Анализ всех данных*
- 2. Выводы*



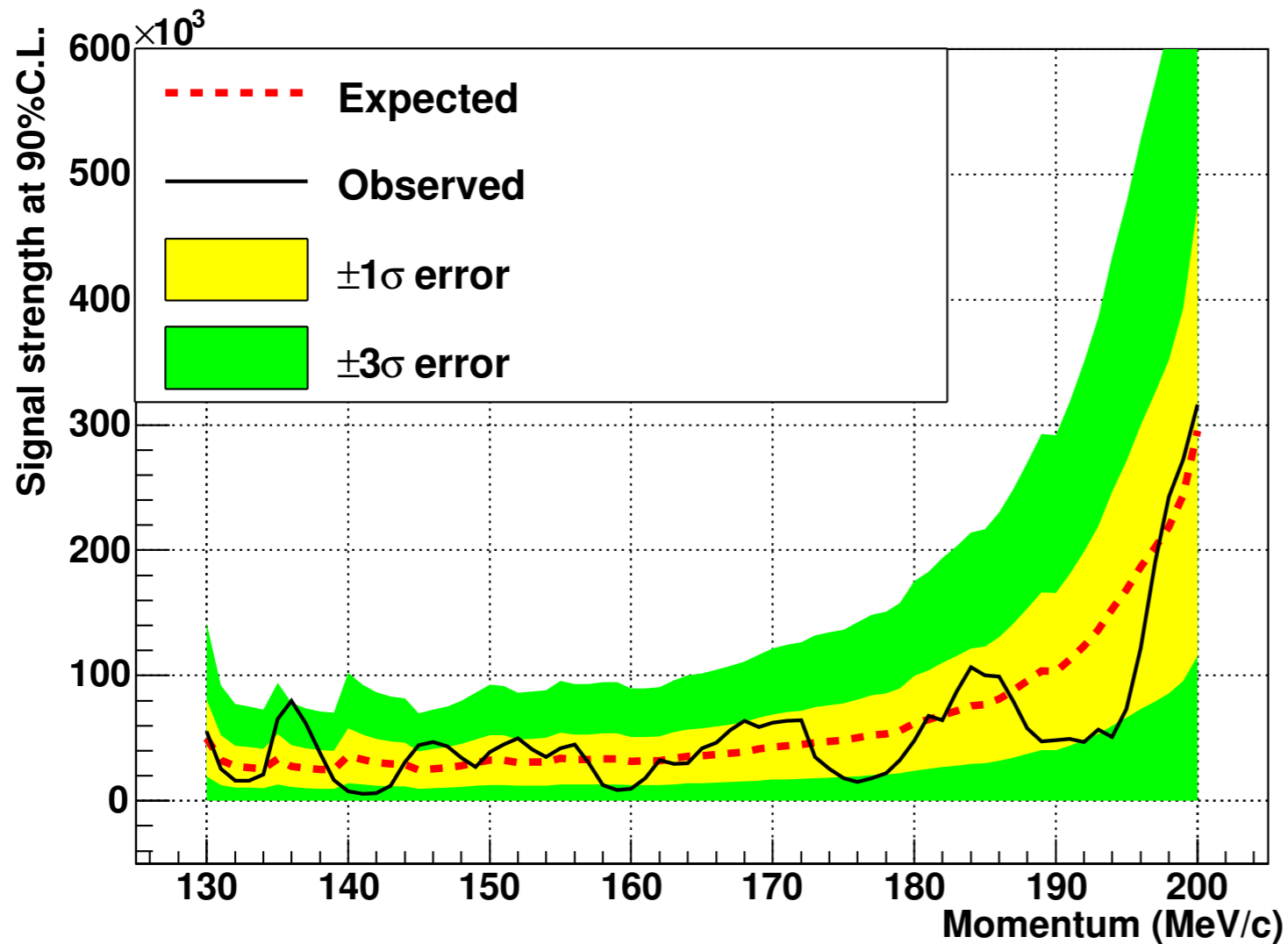
АНАЛИЗ ВСЕХ ДАННЫХ

после всех критериев отбора



$\pm 9\sigma \rightarrow \pm 6\sigma$

АНАЛИЗ ВСЕХ ДАННЫХ



Не найдено
статистически
значимых
доказательств
существования
тяжелых нейтрино

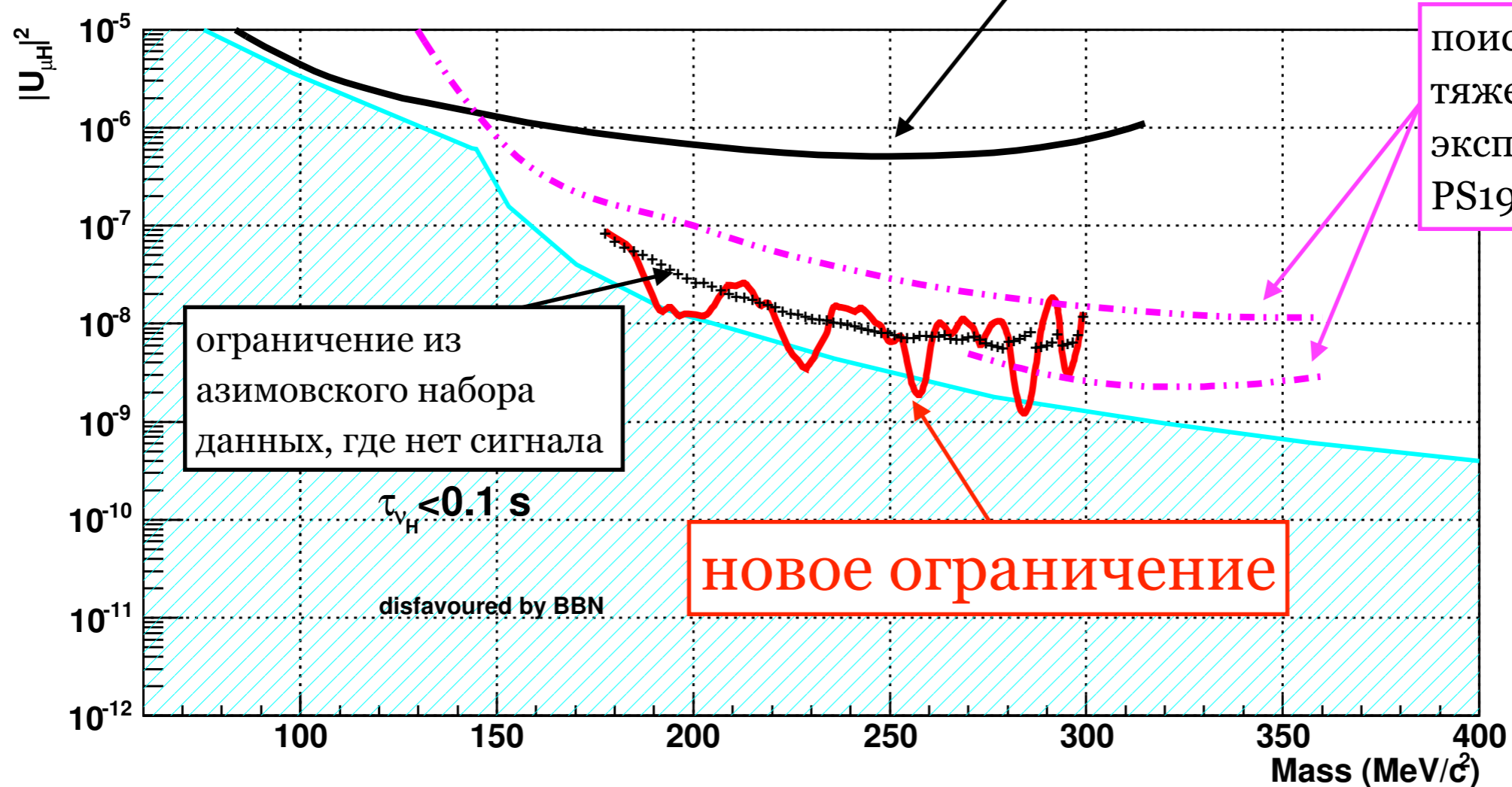


Устанавливаем
ограничение на
параметр
смешивания

ПАРАМЕТР СМЕШИВАНИЯ

$$|U_{\mu H}|^2 = \frac{N_{candidates}}{Acc \times N_K \times \rho \times BR(K_{\mu 2})} \rightarrow \mu$$

предыдущий поиск пиков в распадах каонов



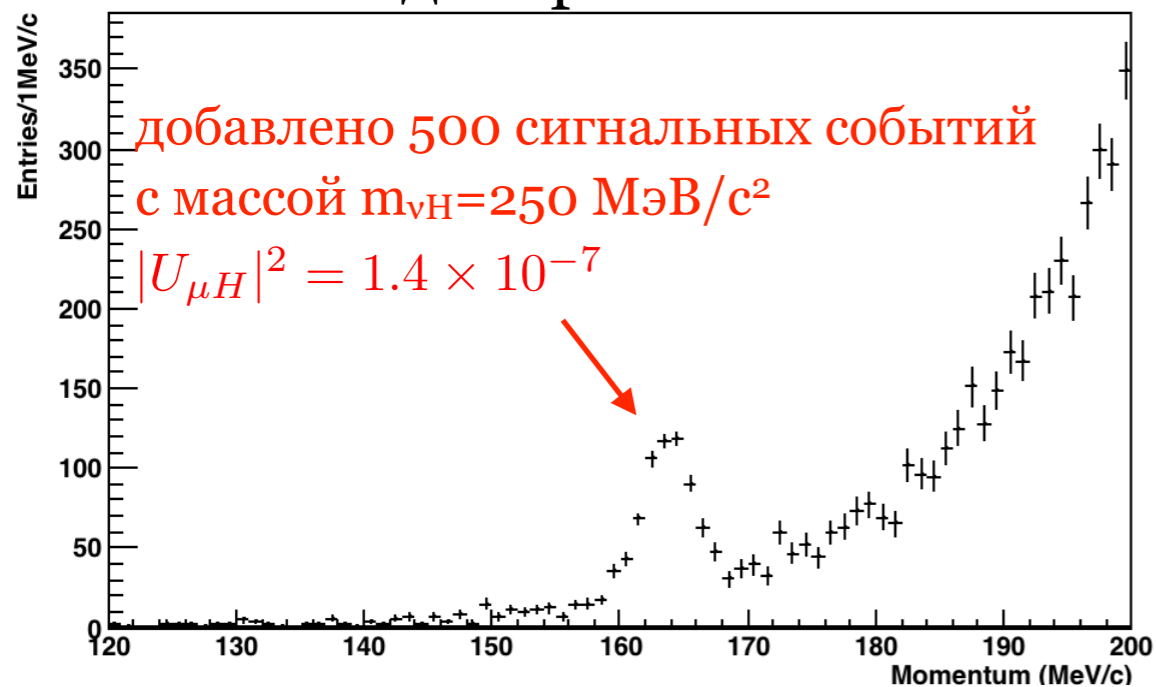
ограничение из азимовского набора данных, где нет сигнала

новое ограничение

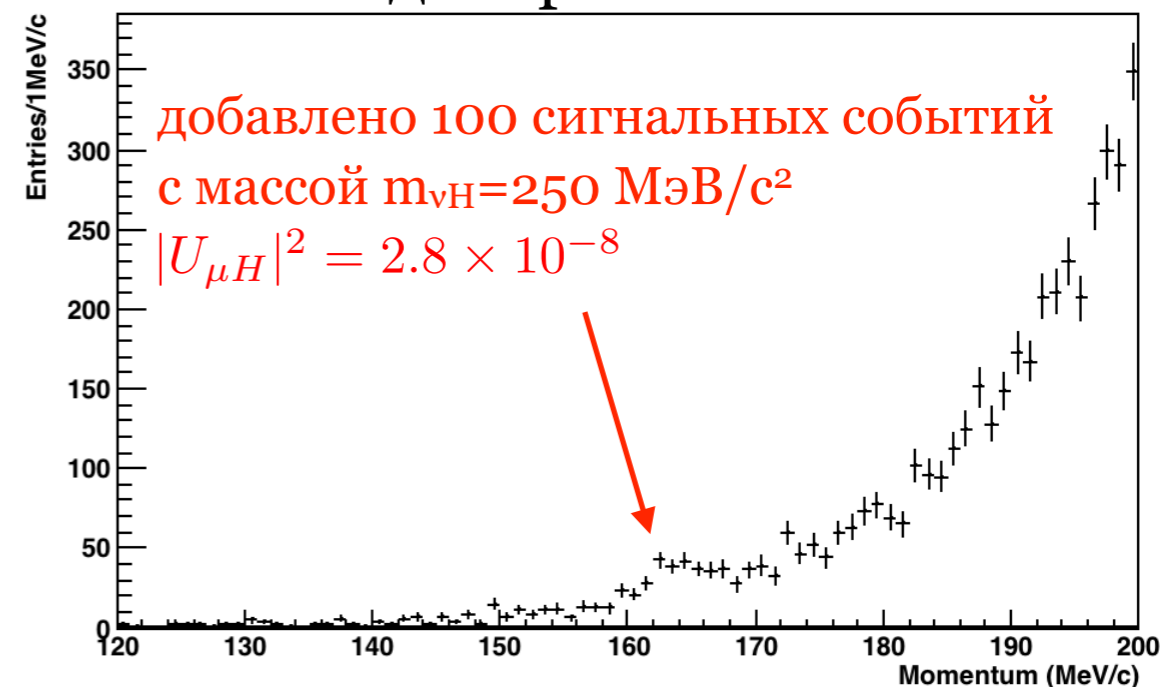
поиск распадов тяжелых нейтрино в эксперименте CERN PS191

ИЛЛЮСТРАЦИЯ СИГНАЛА

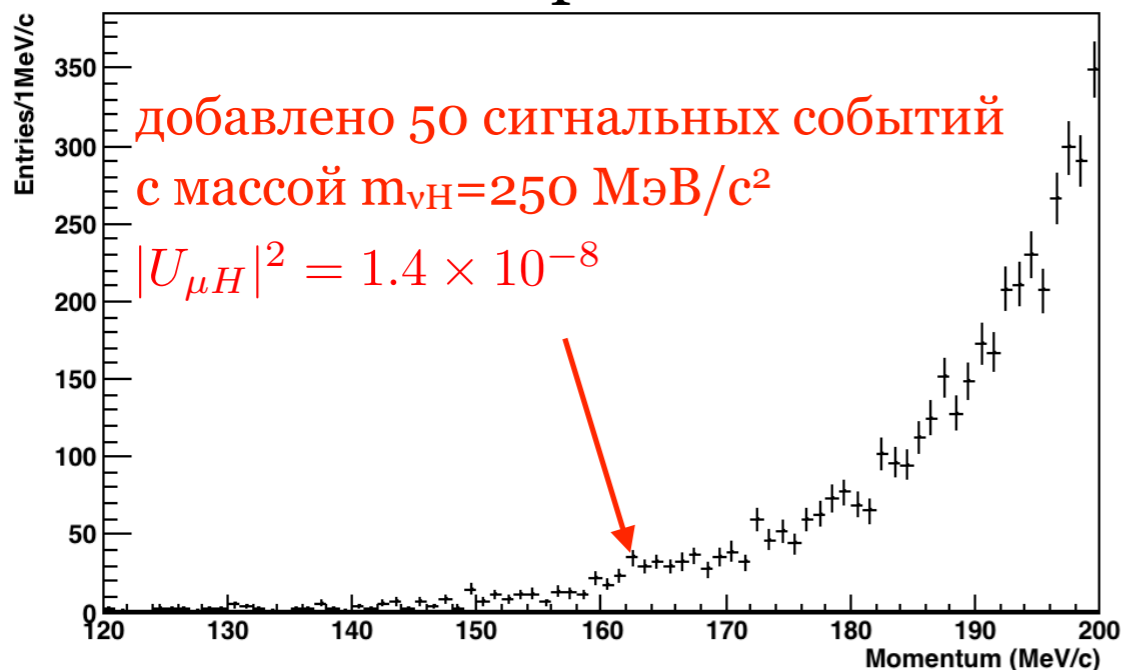
моделирование



моделирование

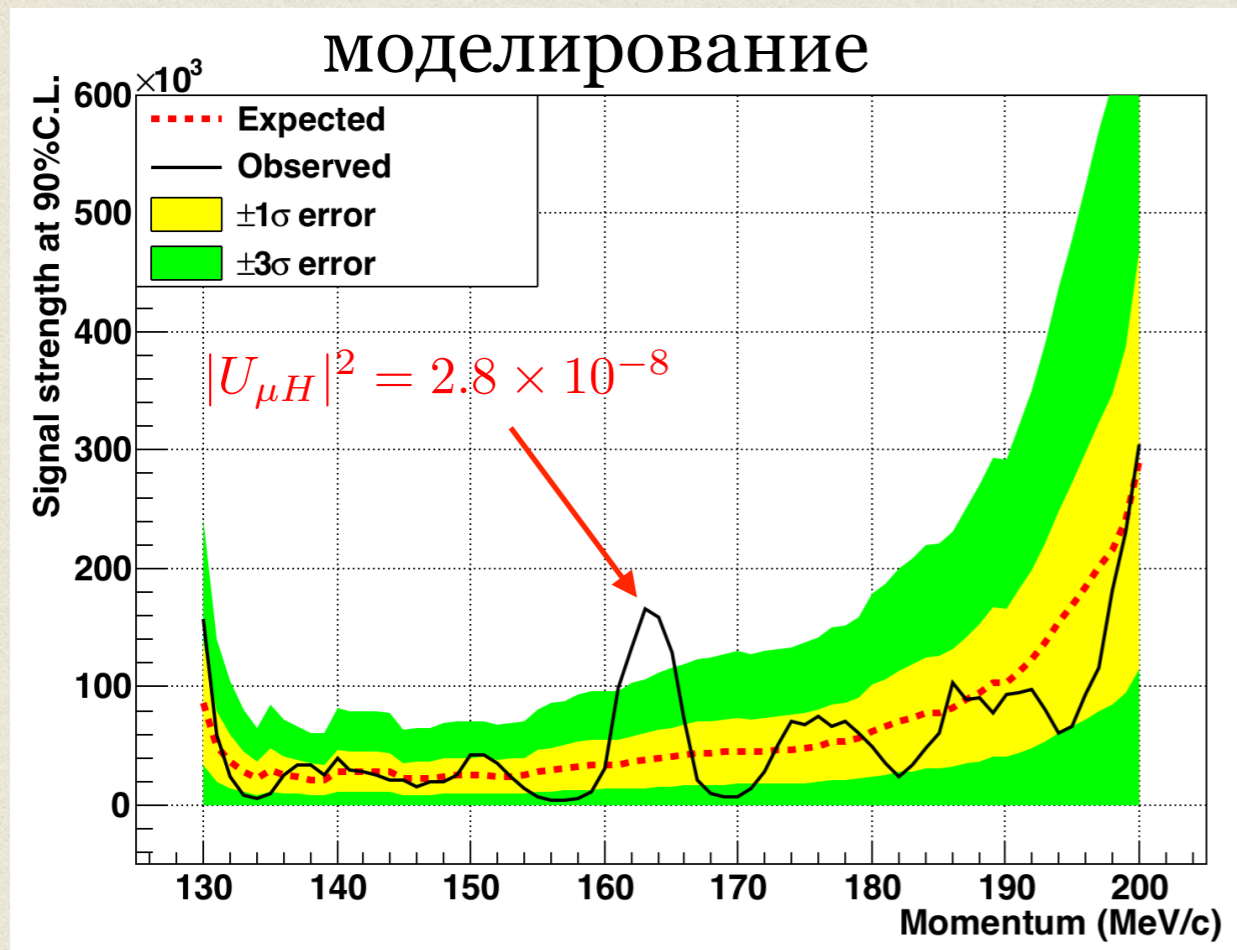


моделирование



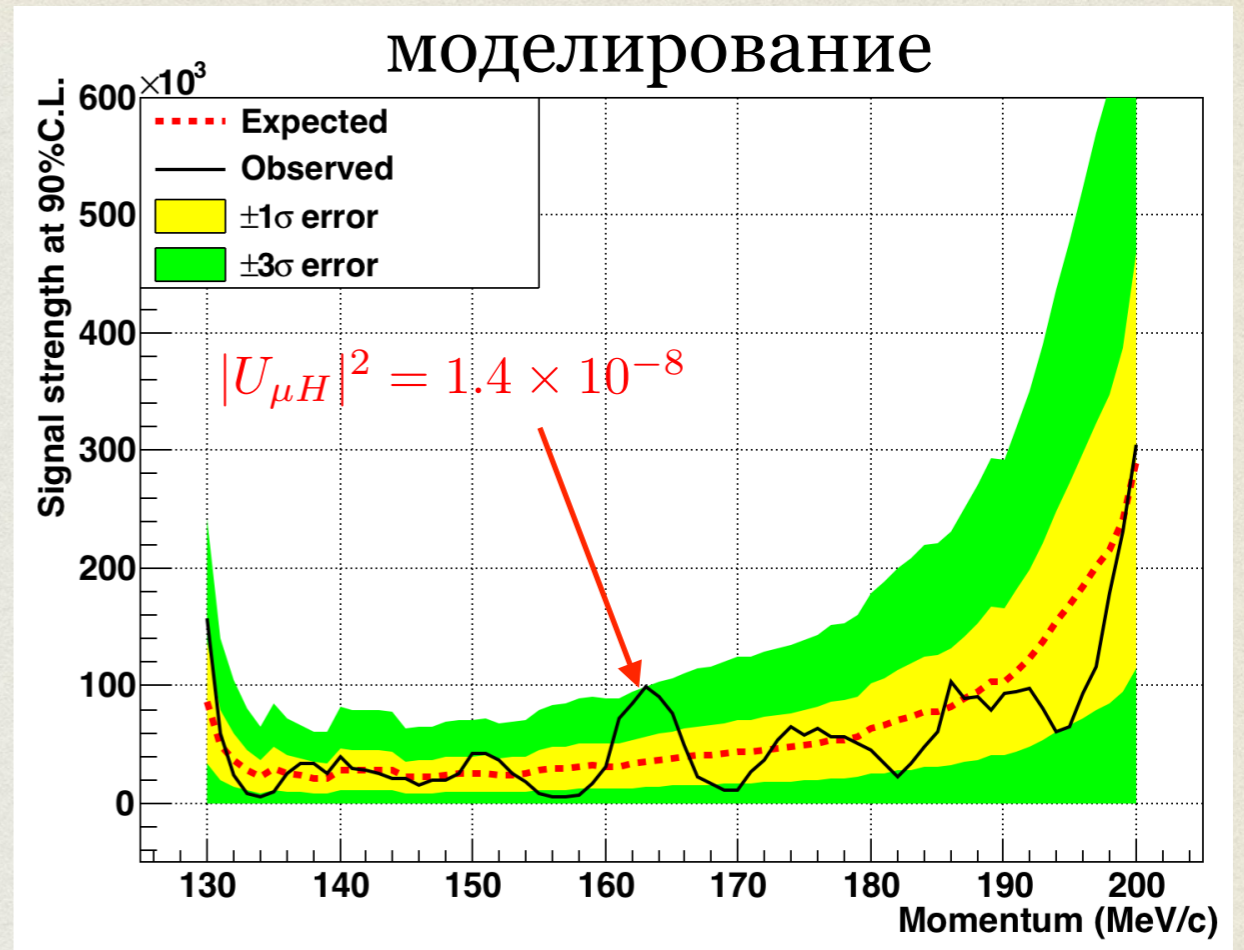
Генерируем фон экспонентой
(взятой из фита всех данных в
диапазоне 120–200 МэВ/ c) и
добавляем сигнал

ИЛЛЮСТРАЦИЯ СИГНАЛА



видим эффект на уровне 5.6σ

добавлено 100 сигнальных событий
с массой $m_{\nu H} = 250$ МэВ/ c^2



не видим эффект

добавлено 50 сигнальных событий
с массой $m_{\nu H} = 250$ МэВ/ c^2

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Для поиска тяжелых нейтрино в распадах положительных каонов разработаны методы анализа мюонных событий, прошедших основной триггер эксперимента E949, оптимизированный для регистрации пионов от распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$.
2. Проведена оптимизация критериев отбора для идентификации мюона в основном триггере эксперимента E949.
3. Измерен аксептанс распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ в зависимости от импульса вылетающего мюона в основном триггере эксперимента и определена чувствительность эксперимента к искомому распаду в отсутствии фоновых процессов. Величина чувствительности остается практически постоянной для исследуемого диапазона импульсов мюонов 130–200 МэВ/с, что соответствует диапазону масс тяжелого нейтрино 175–300 МэВ/с², и равна 7.35×10^{-10} .
4. Измерены вероятности распадов $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ и $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$ в интервале импульсов мюонов 140–200 МэВ/с:

$$BR(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu) = 0.54 \pm 0.15, BR(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma, 140 < p_\mu < 200 \text{ МэВ/с}) = (1.3 \pm 0.4) \times 10^{-3}$$

Полученные вероятности в пределах ошибок согласуются с измеренными ранее значениями этих распадов. Данные измерения подтверждают надежность определения аксептанса распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ в основном триггере эксперимента E949.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

5. После анализа распадов 1.70×10^{12} остановленных каонов в диапазоне импульсов вылетающих мюонов 130–200 МэВ/с не найдено статистически значимых доказательств существования тяжелых нейтрино в диапазоне масс 175–300 МэВ/с². Это позволяет поставить новые модельно независимые ограничения на элемент матрицы смешивания между мюонным и тяжелым нейтрино, $|U_{\mu N}|^2$, в исследуемом диапазоне масс, т.к. при данном методе поиска тяжелых нейтрино не было сделано никаких предположений относительно природы тяжелых нейтрино и их смешивании с другими частицами СМ.
6. Получены новые модельно независимые ограничения на элемент матрицы смешивания между мюонным и тяжелым нейтрино, $|U_{\mu N}|^2$, в диапазоне масс 175–300 МэВ/с², которые изменяются от 10^{-7} до 10^{-9} для доверительного интервала 90%. Полученные ограничения почти на два порядка превосходят предыдущие ограничения из распадов каонов и примерно на порядок улучшают ограничения из поиска распадов тяжелых нейтрино в эксперименте CERN PS191 в диапазоне масс 175-270 МэВ/с². Новые ограничения являются лучшими в мире ограничениями на элемент матрицы смешивания между мюонным и тяжелым нейтрино, $|U_{\mu N}|^2$.

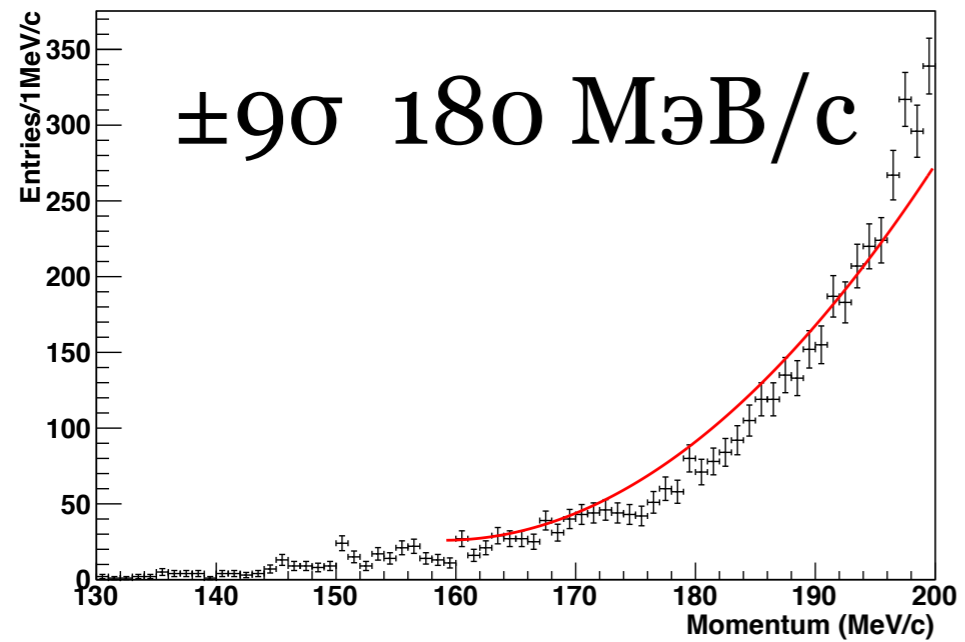
СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ



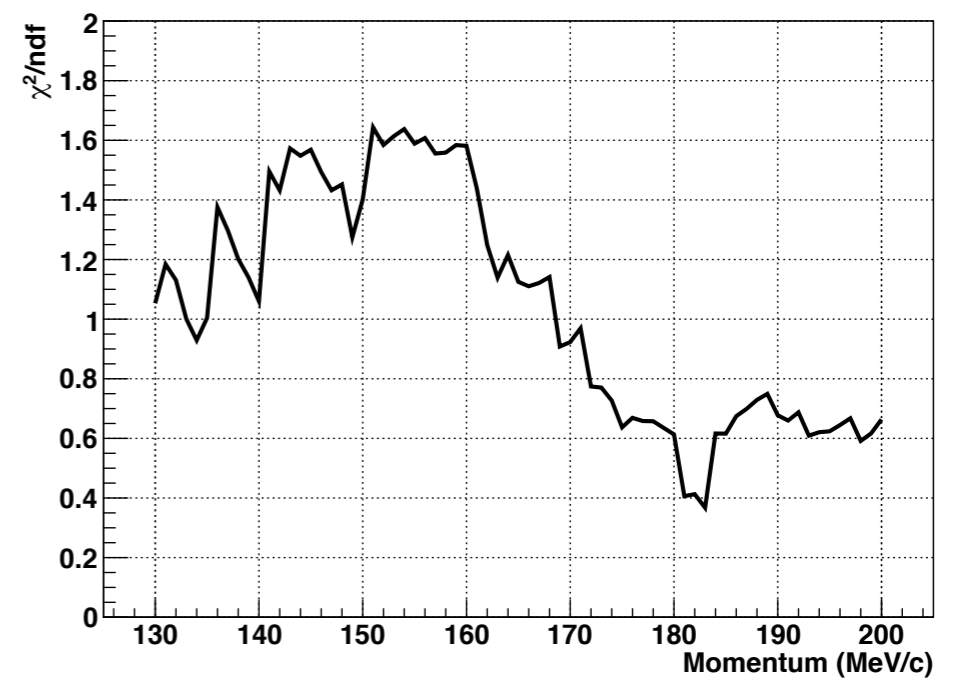
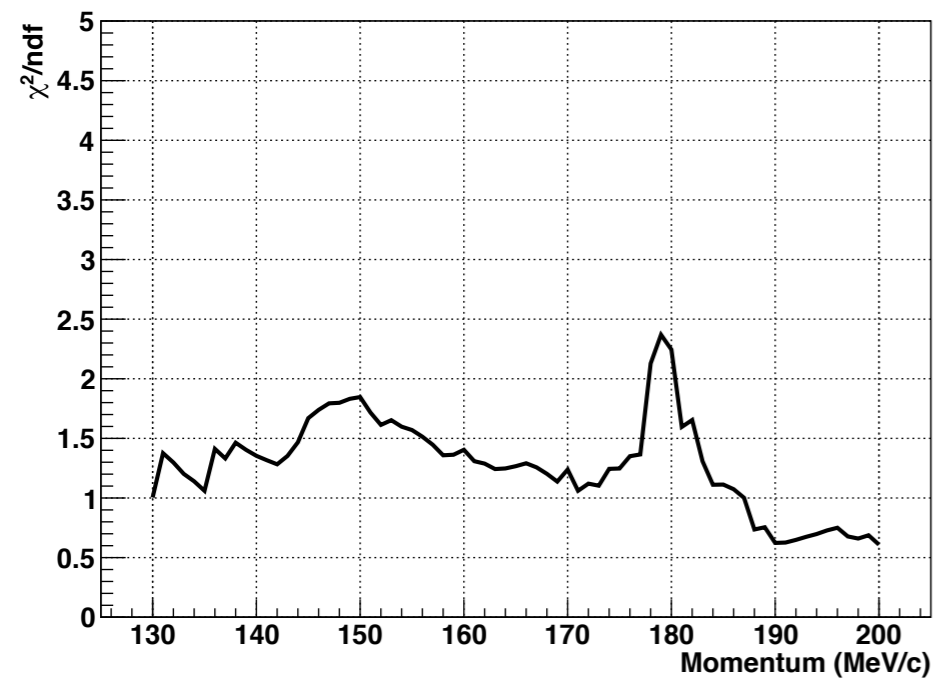
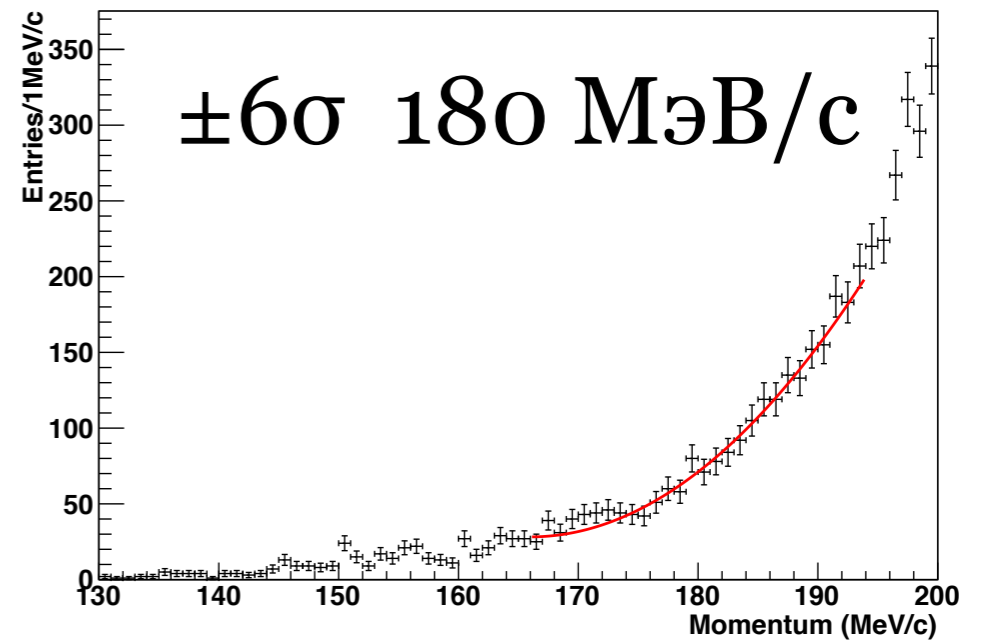
ДОПОЛНЕНИЯ

$\pm 9\sigma \rightarrow \pm 6\sigma$

histogram from data

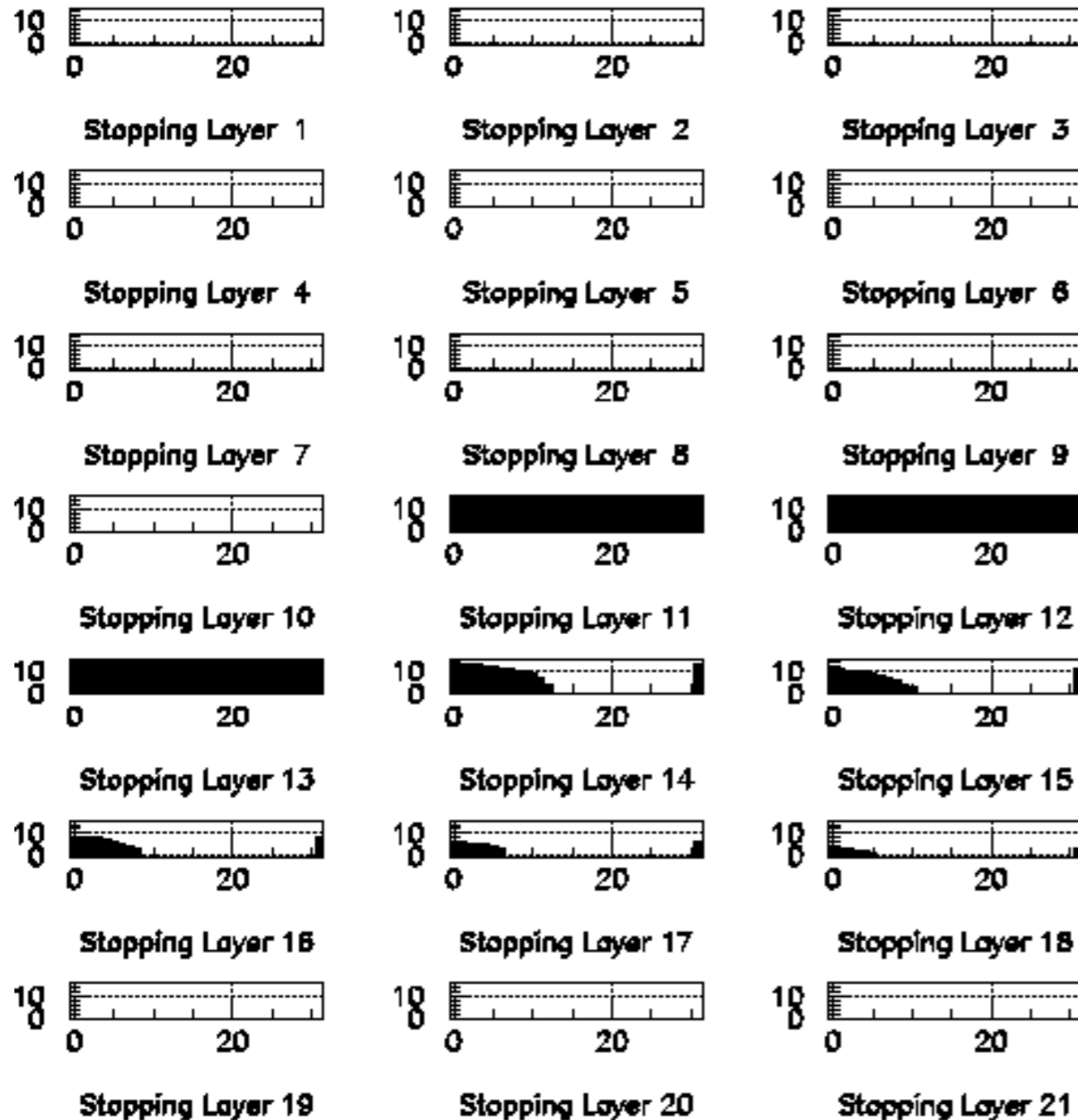


histogram from data



Refined Range mask

z2/04/04 10.52

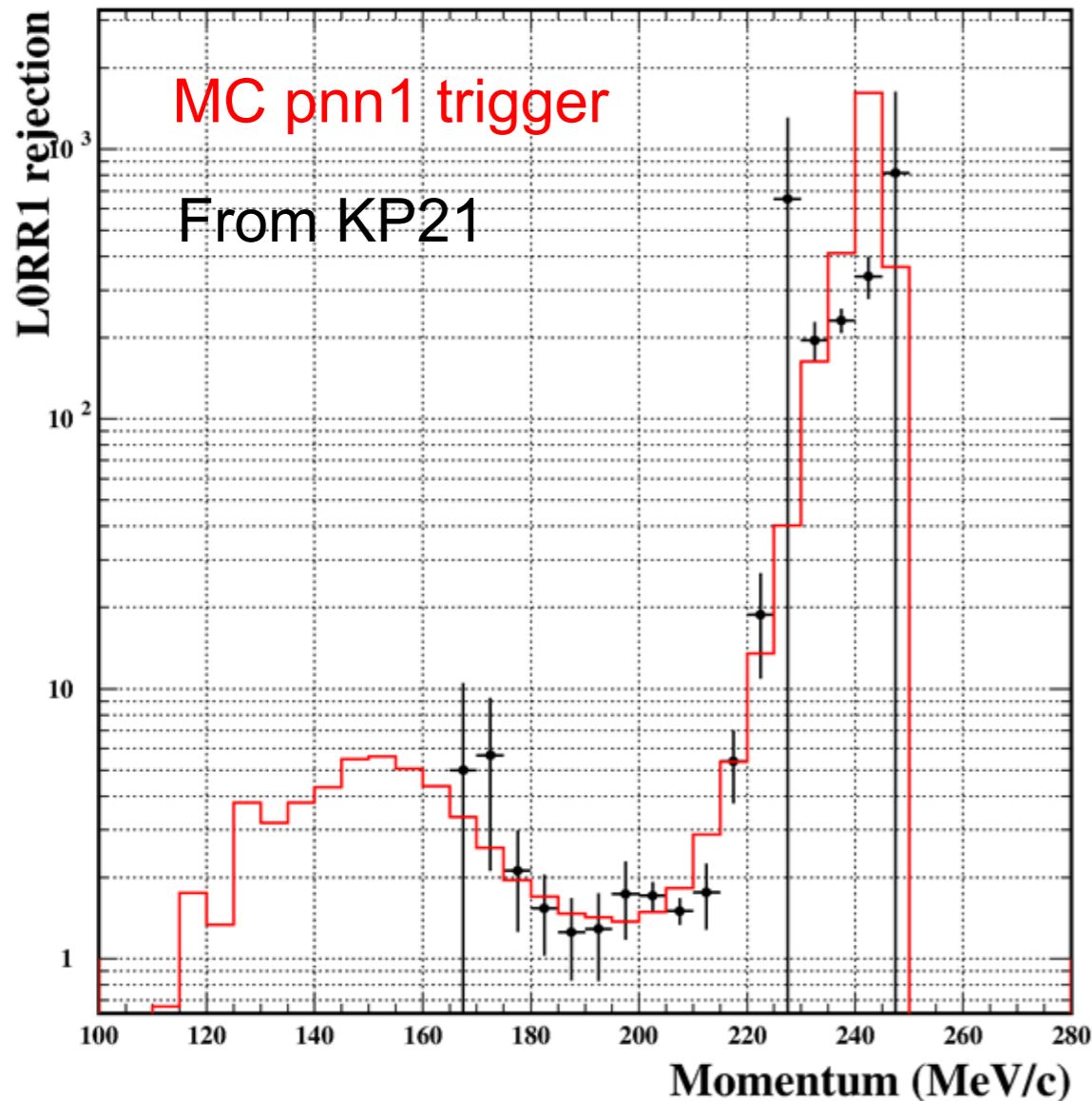


For each plot the x-axis is TAVGZ (average level 0 z measurement) and the y-axis is TNTG (# hit target elements (online))

To interpret the plots: accept events when it is black in the histograms.

Stopping layers 1 – 5 are empty.

Refined Range for pnn1 trigger (L0rr1)



Use monitor trigger (KP21) and some offline cuts to select pure muon sample:

KP21, RD_TRK, TRKTIM, STLAY, BAD_STC, UTC, RDUTM, TGPVCUT, TARGET, ICBIT, DCBIT, UTCQUAL, COS3D, ZFRF, ZUTOUT, PRRF, DELC, beam&target, target kinematic, OPSVETO, PV90(w/o RDPV)

No range cuts

MC L0RR1:

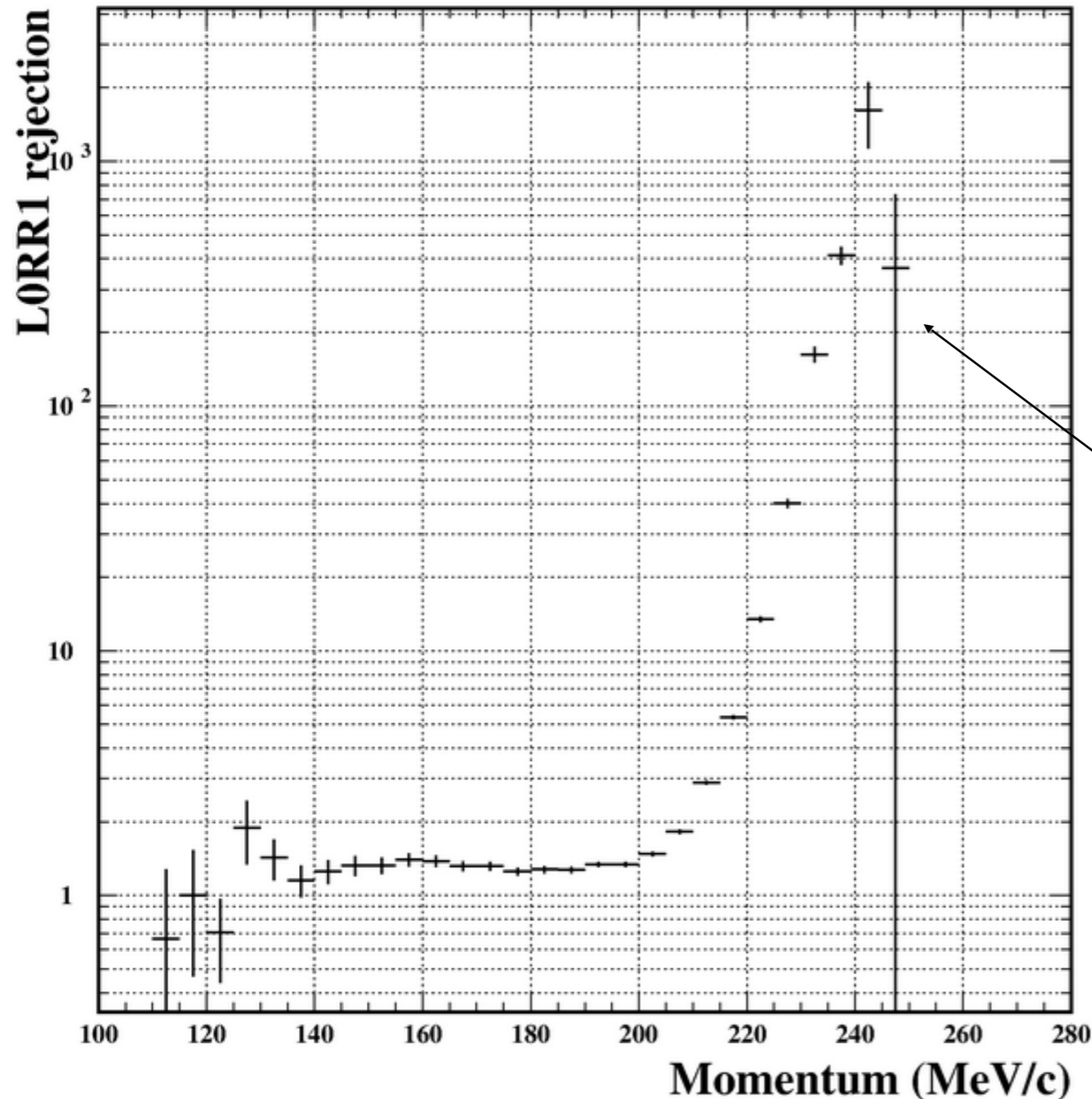
pnn1, UTCQUAL, COS3D, ZFRF, ZUTOUT

So, MC simulates L0rr1 cut very well in the momentum region below ~220 MeV/c.

We will use MC simulation to study L0rr1 cut within pnn12 trigger

$$KP21 \equiv KB \cdot T \cdot 2 \cdot (6_{ct} + 7_{ct}) \cdot \overline{19}_{ct}$$

Refined Range 1 for pnn12



Use MC simulation of Km2+Km2g in pnn12 trigger

Number of events w/o L0rr1 cut
Number of events with L0rr1 cut

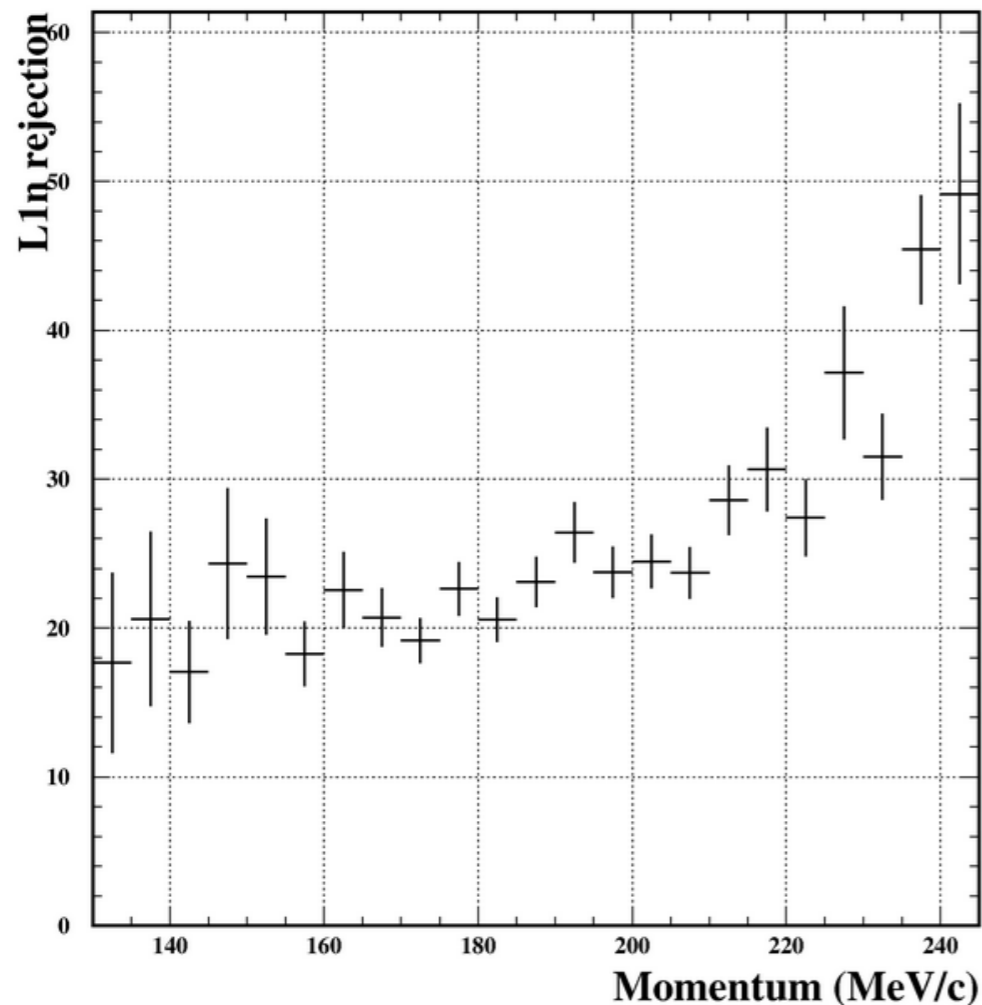
Events that fail L0rr1 requirement in pnn1 trigger may pass pnn2 trigger requirements. That's why we see flat distribution of L0rr1 rejection in pnn(1+2) trigger (below 200 MeV/c).

Online pion identification (L1n)

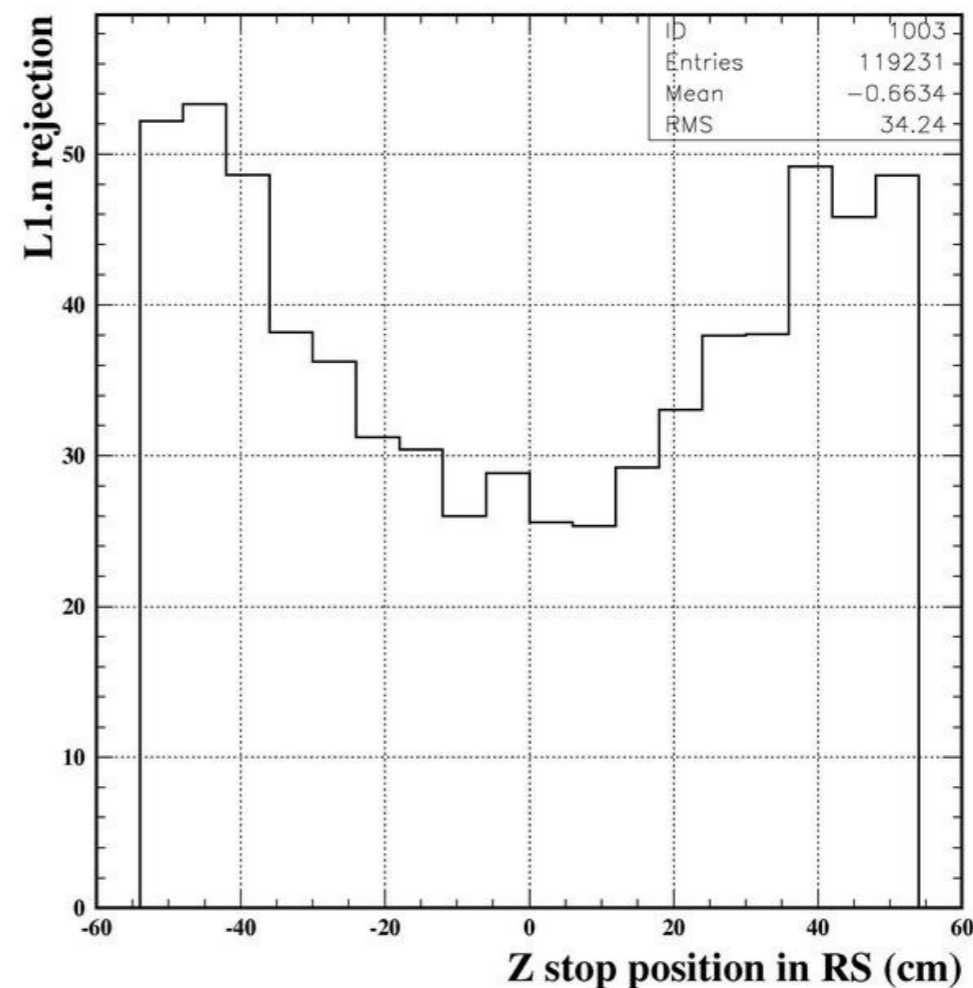
- **Online $\pi \rightarrow \mu$ decay requirement:**
 - ✓ The pulse height (PH) and the area (PA) of the pulse(s) recorded by TDs in the stopping counter are compared. The ratio PH/PA would be smaller for double pulses than for a single pulse
- **Requirements for stopping counter finding:**
 - ✓ Events are rejected if coincident hits are detected in a RS near the stopping counter
 - ✓ Events are rejected if one of two adjacent hextant hits is not due to a charged track

Online pion identification (L1n)

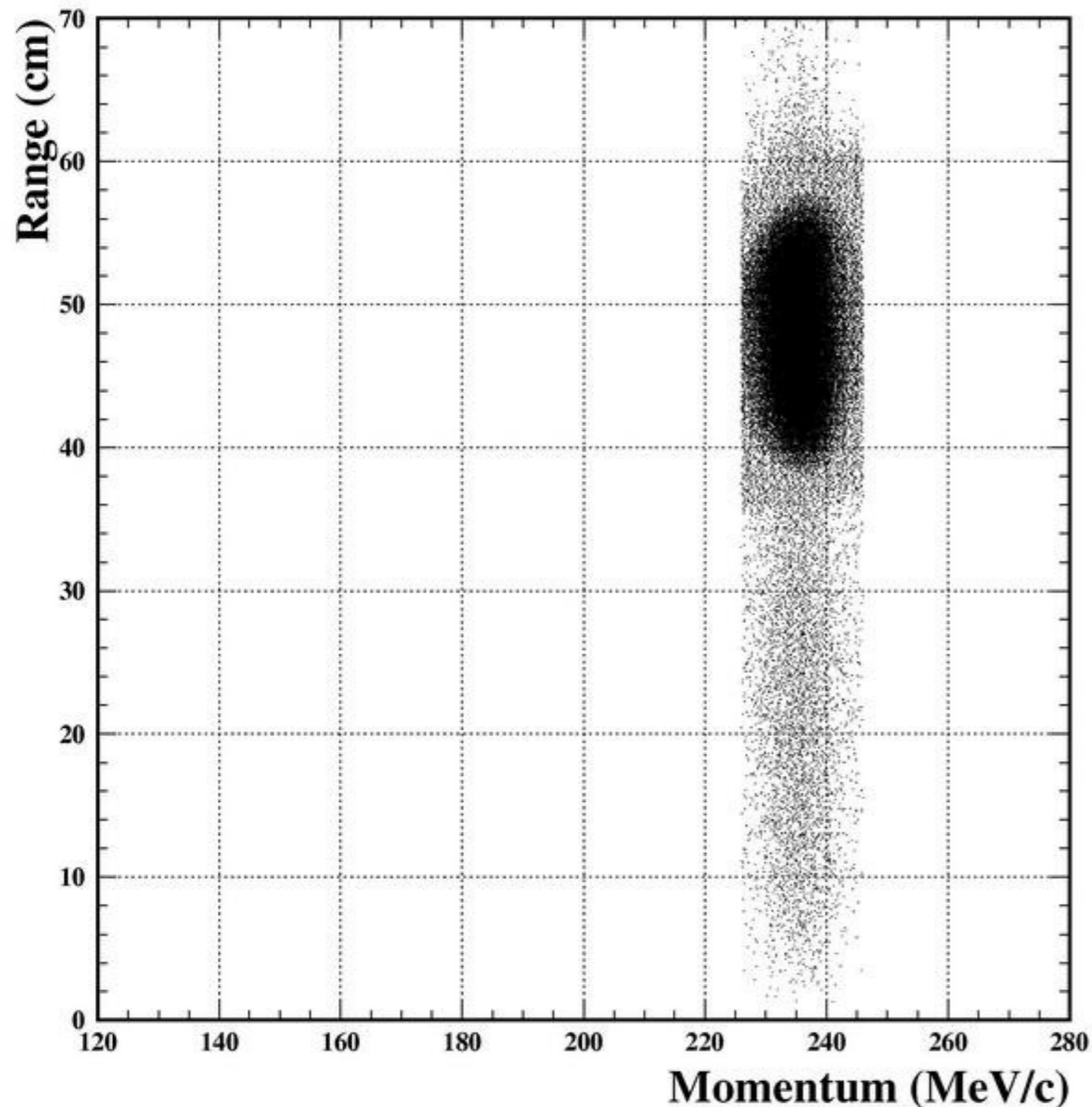
Use monitor trigger (KP21) and some offline cuts to select pure muon sample: KP21, UTCQUAL, COS3D, ZFRF, ZUTOUT, PRRF, B4DEDX, PV90, RNGMOM. No TD cuts



**We use Z-dependence
of L1n cut to emulate it
in MC**



Offline cuts acceptances: Beam & Target cuts



Use KM21 trigger:

$$KM21 = KB \cdot T \cdot 2 \cdot (6_{ct} + 7_{ct}) \cdot (17_{ct} + 18_{ct} + 19_{ct})$$

Setup cuts: KM21 trigger,
ICBIT, RDTRK, TRKTIM, RDUTM,
KM2PBOX, COS3D, UTCQUAL.

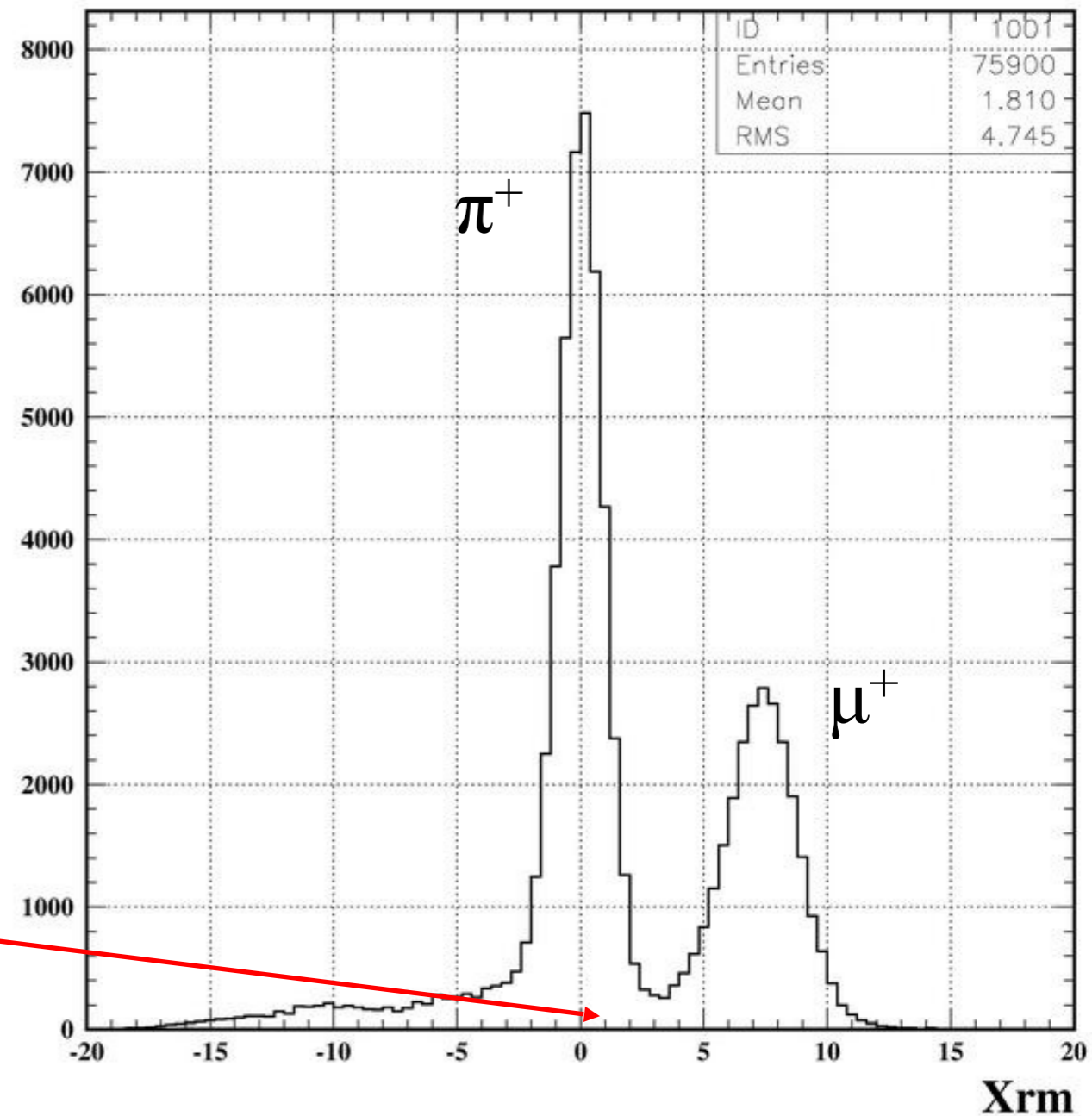
Offline cuts acceptances: inverted RNGMOM(1)

Cut definition:

$$\chi_{rm} \equiv \frac{R_{meas} - R_{ex}}{\sigma_R}$$

Muons and pions are derived from pnn12 trigger data.

cut position

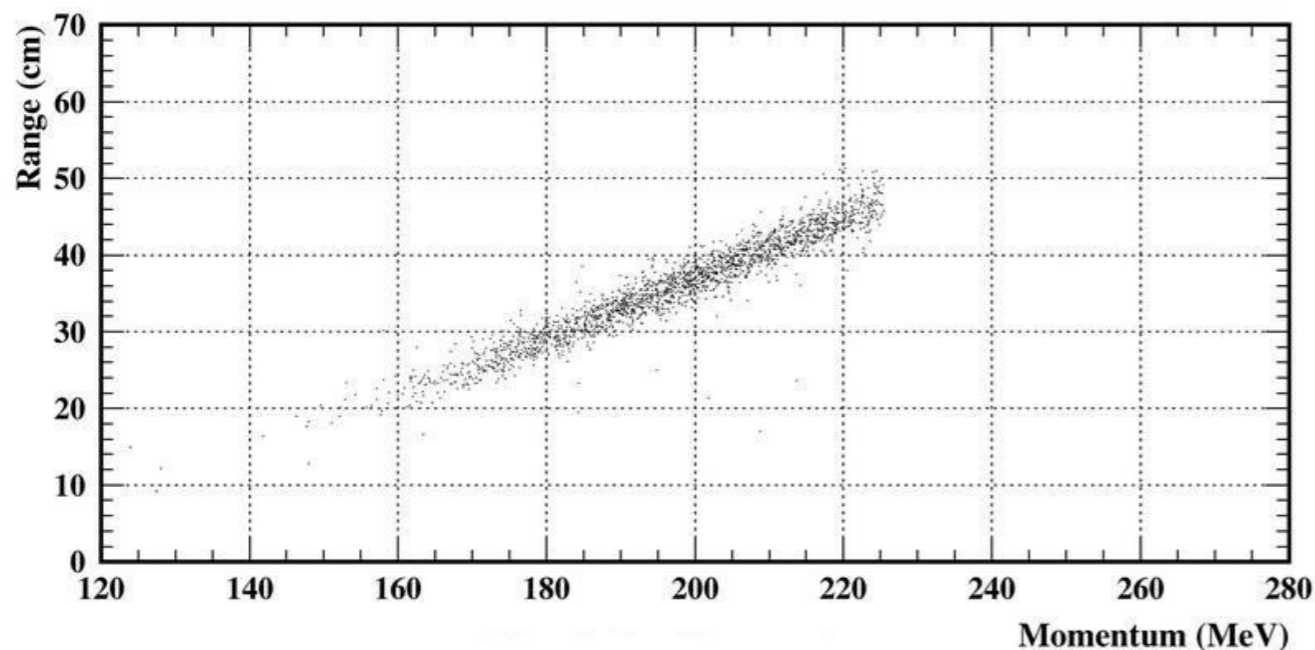


Offline cuts acceptances: inverted RNGMOM(2)

Use KP21 trigger
to select muon band:

$$KP21 = KB \cdot T \cdot 2 \cdot (6_{ct} + 7_{ct}) \cdot \overline{19_{ct}}$$

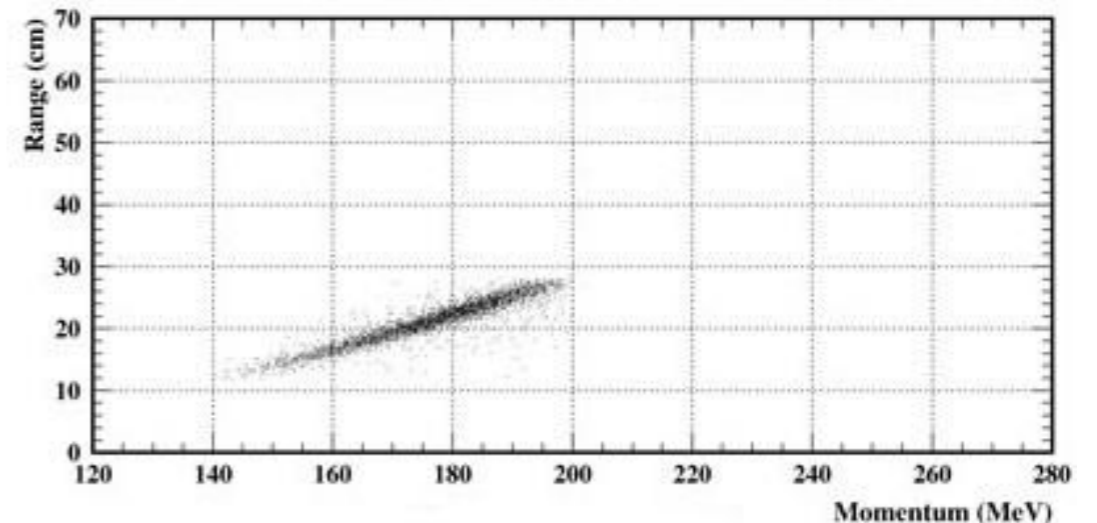
Setup cuts: KP21 trigger,
UTCQUAL, PRRF, PRRFZ, COS3D,
PVCUTNEW, -TDCUT02, -EV5, ptot<227



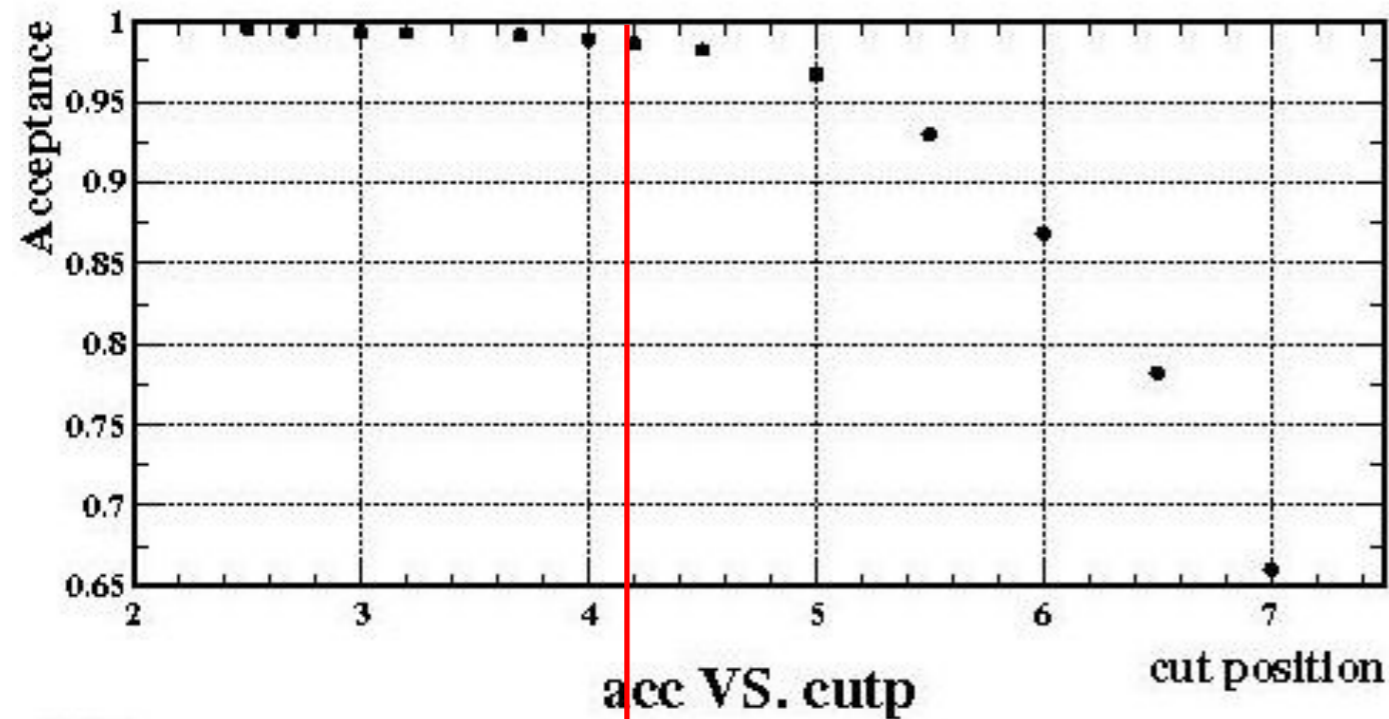
Use PISCAT trigger
to select pions:

$$PISCAT = \pi B \cdot \overline{DC} \cdot IC \cdot T \cdot 2 \cdot (6_{ct} + 7_{ct}) \cdot \overline{BV + BVL + EC} \cdot HEX$$

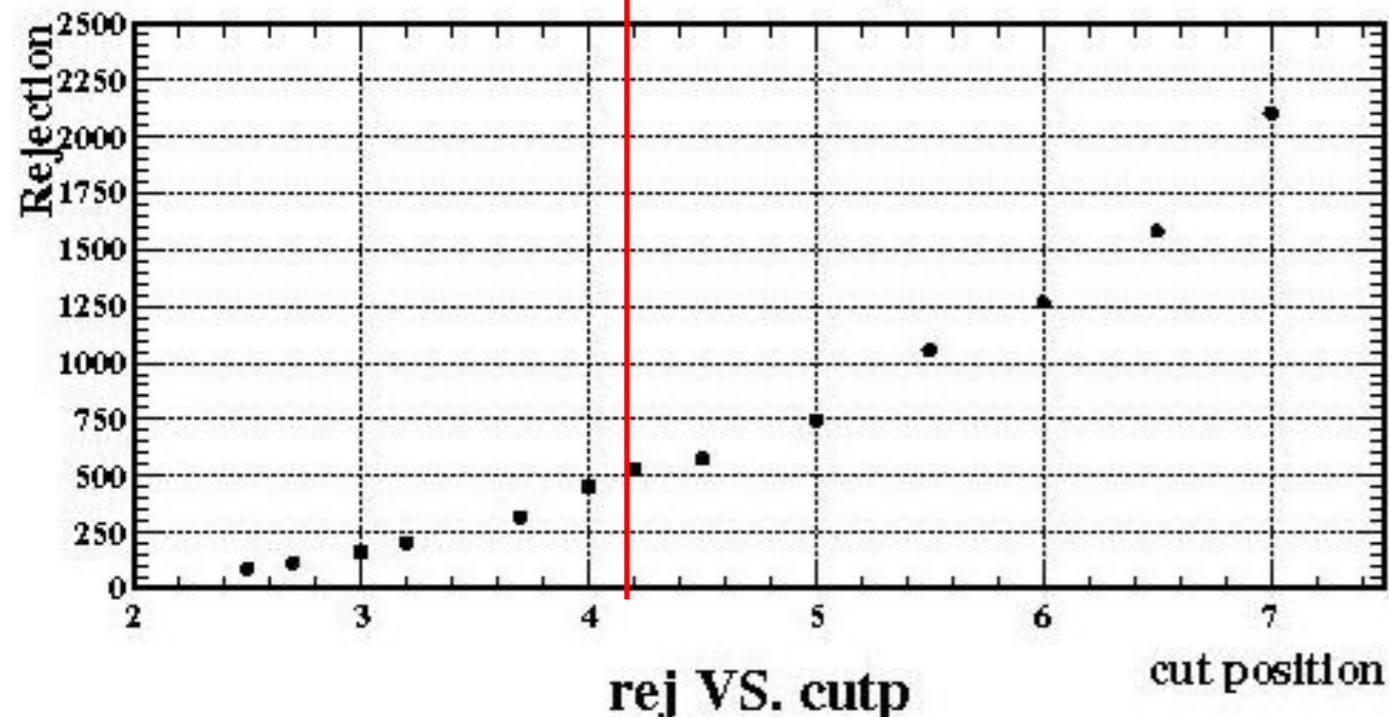
Setup cuts: PISCAT trigger,
UTCQUAL, B4ABM_PITAG, TIC, RTDIF,
DTGTTP, TGQUALT, TGZFOOL, CKTRS,
CKTAIL, COS3D, BOX2, BAD_STC, TDCUT02



Offline cuts acceptances: inverted RNGMOM(3)

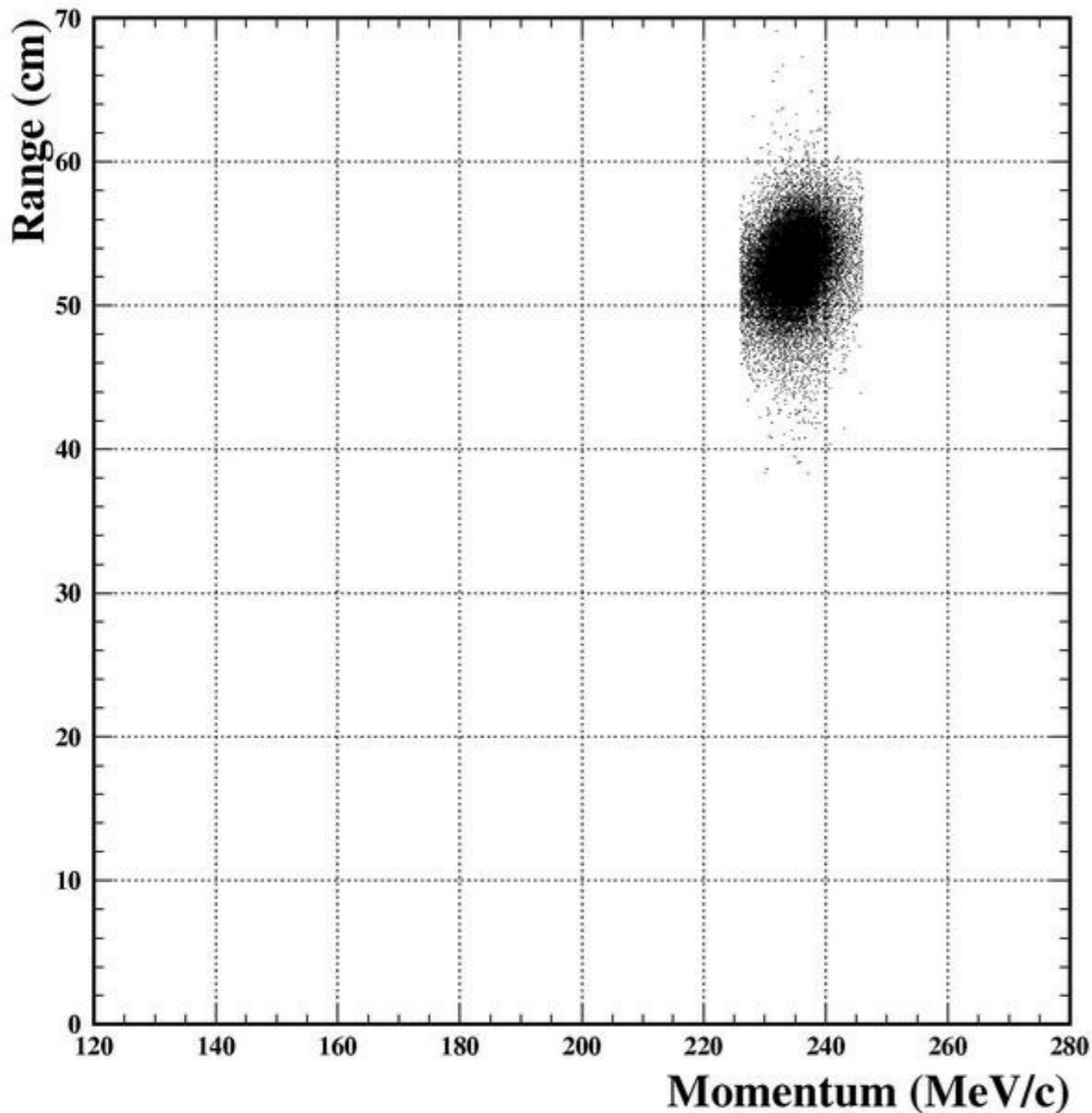


Events are rejected if $X_{rm} < 4.2$



$$A_{RNGMOM} = 0.9739 \pm 0.0012$$

Offline cuts acceptances: Photon Veto



Use KM21 trigger:

$$KM21 = KB \cdot T \cdot 2 \cdot (6_{ct} + 7_{ct}) \cdot (17_{ct} + 18_{ct} + 19_{ct})$$

Setup cuts: KM21 trigger, ICBIT, RDTRK, TRKTIM, RDUTM, KM2PBOX, COS3D, UTCQUAL, beam and target cuts, stopping layer < 19

Photon Veto cut contains online PV and offline PV

Km2 branching ratio

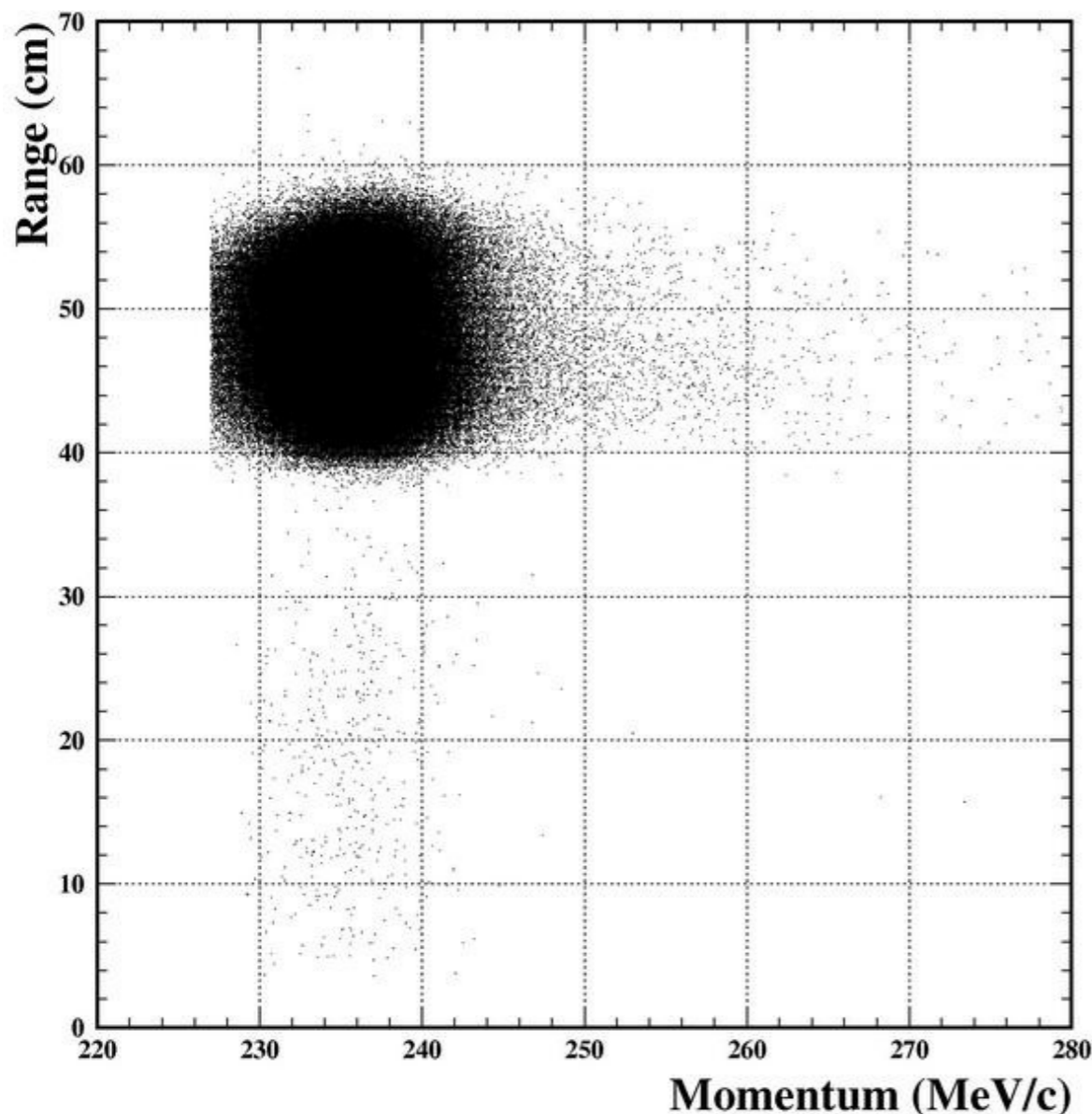
Use 1/20 pnn1 data, all cuts were applied.

$$BR(K_{\mu 2}) = \frac{N_{K_{\mu 2}}}{\varepsilon_{T \cdot 2} \times f_s \times (K\text{live})_{1/20} \times A_{K_{\mu 2}, \text{trig}}^{\text{UMC}} \times A_{K_{\mu 2}, \text{kin}}^{\text{UMC}} \times A_{L1n} \times A_{19_{ct}} \times A_{L0rr1} \times A_{\text{offline_cuts}}}$$
$$A_{\text{offline_cuts}} = A_{\text{PRRF}} \times A_{\text{OPSVETO}} \times A_{\text{UTCQUAL}} \times A_{\text{beam\&tg}} \times A_{\text{tgkin}} \times A_{\text{PV}}$$

Layer 19

Layer 19 was measured using Km2 events from KM21 monitor trigger.

$$KM21 = KB \cdot T \cdot 2 \cdot (6_{ct} + 7_{ct}) \cdot (17_{ct} + 18_{ct} + 19_{ct})$$

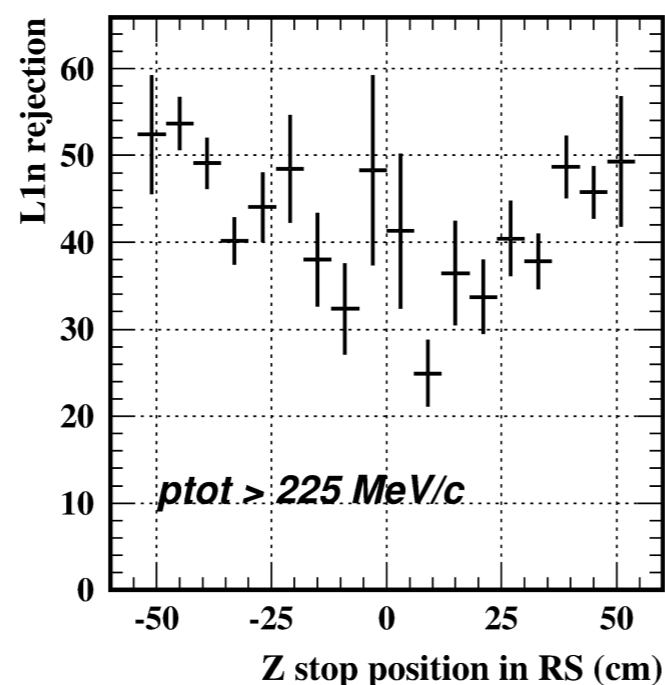
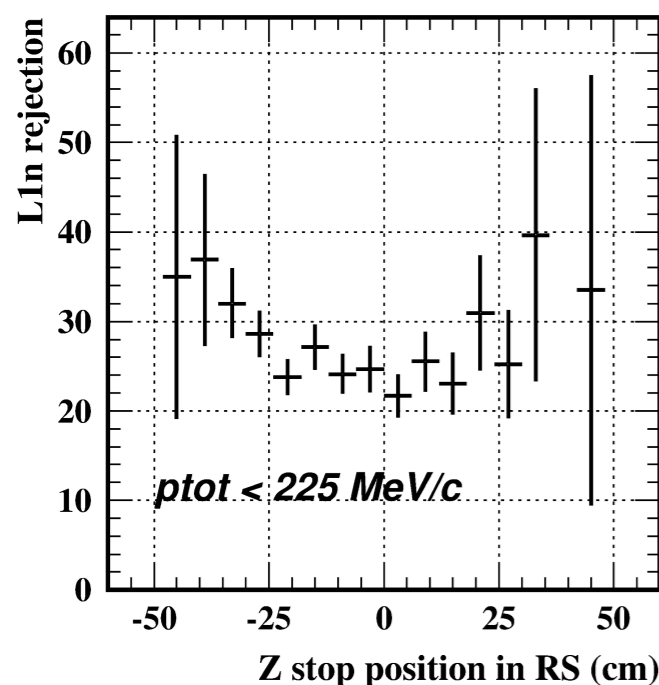
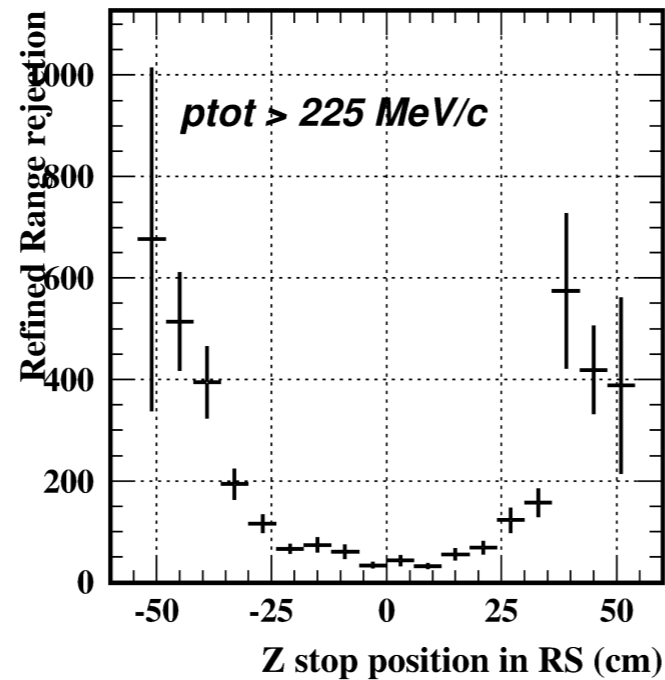
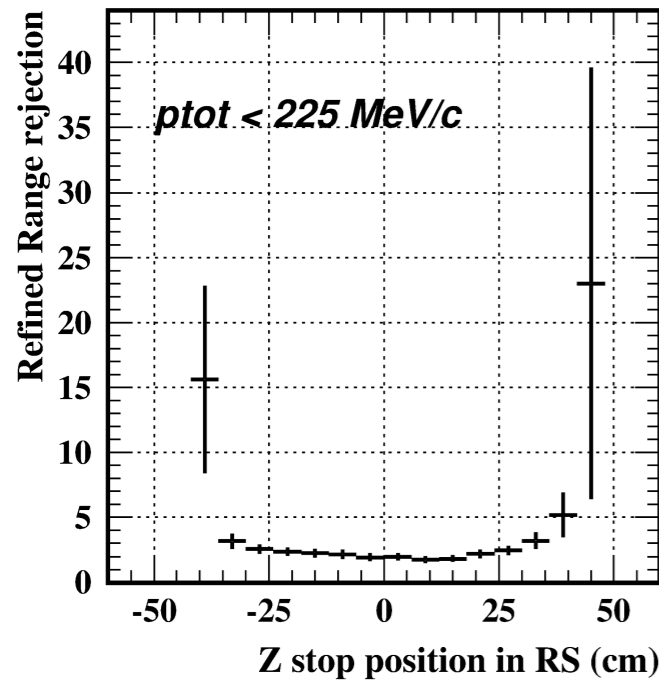


Setup: KM21 trigger, ICBIT, DCBIT,
ptot>230, BEAM&TARGET, PV60(w/o
BV, BVL, RD)

$$A_{19_{ct},online\ pv} = 0.1074 \pm 0.0021$$

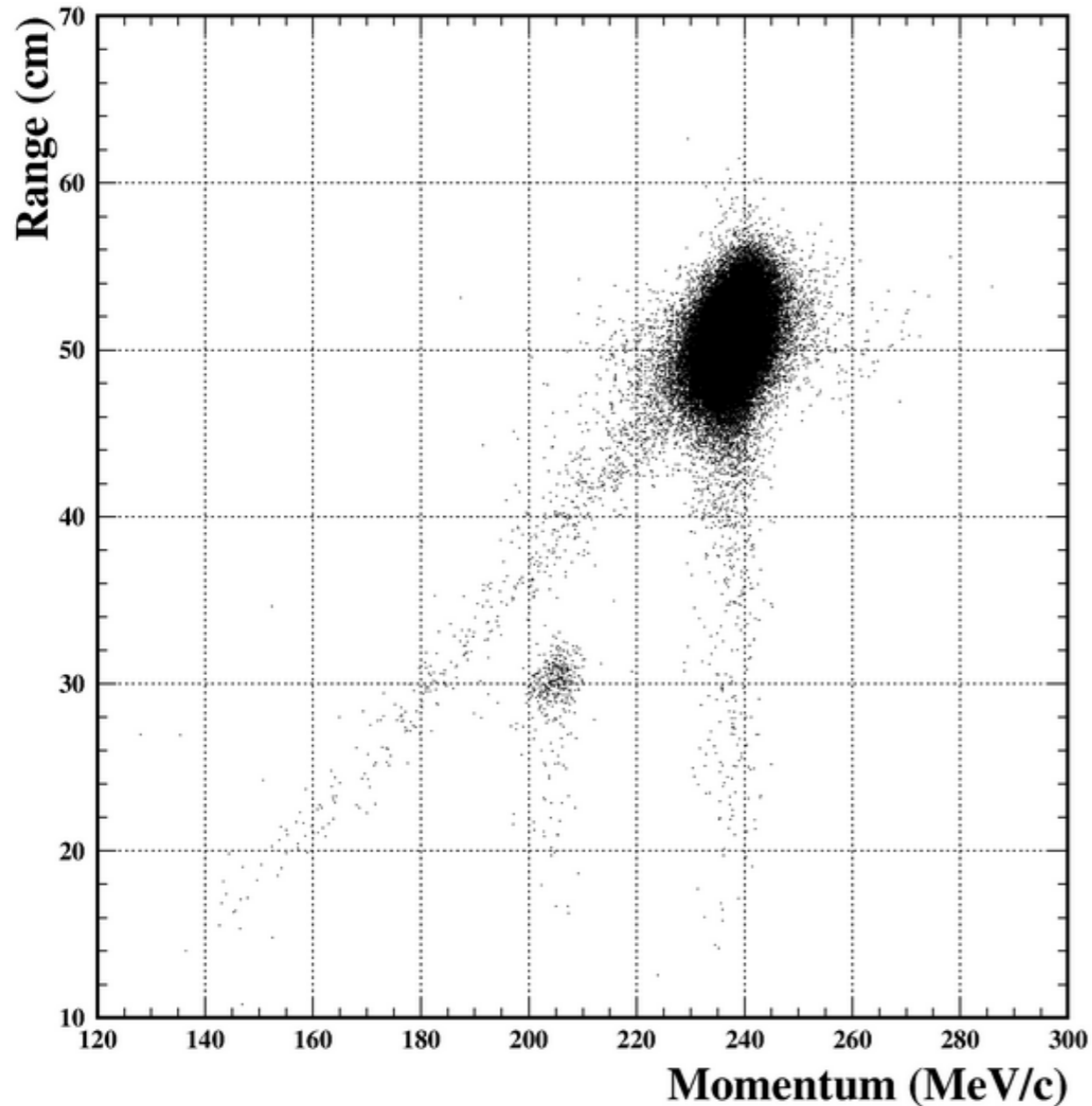
The KM21 trigger has (17ct + 18ct + 19ct) requirement, but it is very unlikely that muon from the Km2 decay stops before layer 17. This effect was checked using MC simulation: less than 3 % of muons from the Km2 decay stop before layer 17.

Correlation between Refined Range and L1n



For the Km2 peak events (right plots) Refined Range cut is strong dependent on Z stop position in RS => we should study Refined Range and L1n cuts together

Refined Range and L1n

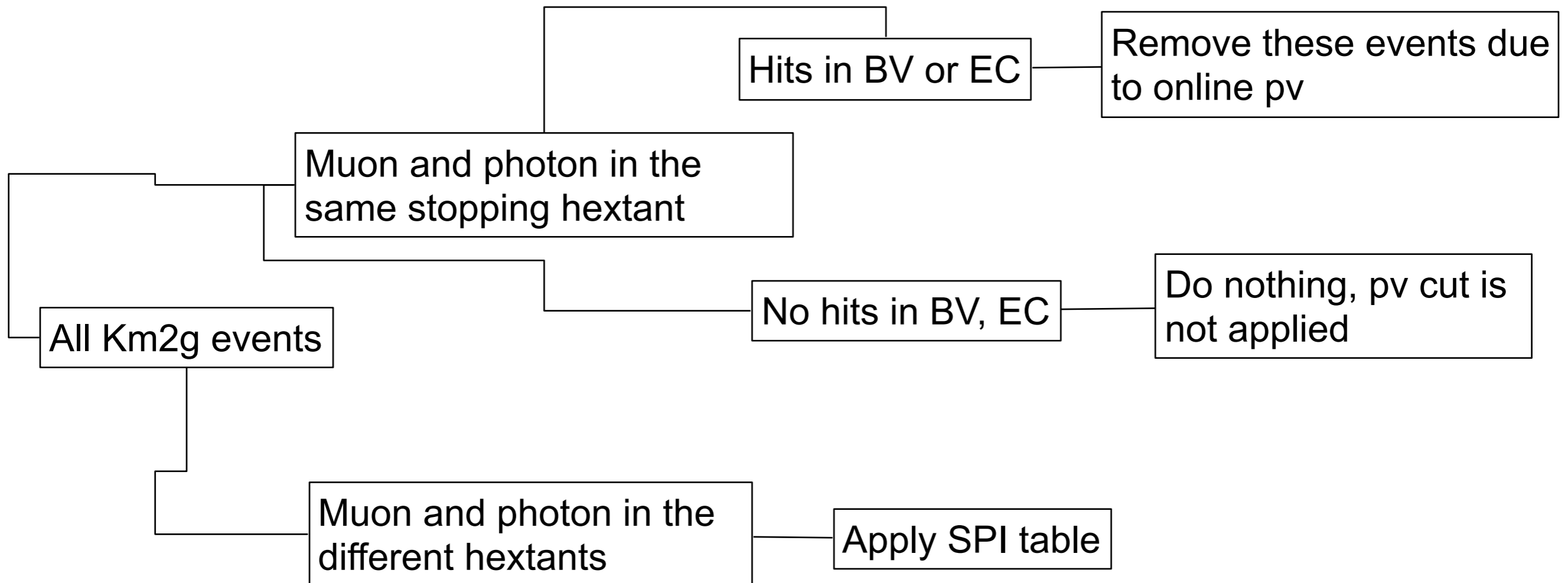


Setup cuts:

KP21, TRKTIM, STLAY, BAD_STC, UTC,
RDUTM, TGPVCUT, TARGET, ICBIT,
DCBIT, UTCQUAL, COS3D, ZFRF,
ZUTOUT, DELC, beam&target, target
kinematic, OPSVETO, PV90(w/o RDPV),
ptot>225

$$A_{L0RR1,L1n} = (1.49 \pm 0.40) \times 10^{-4}$$

PV acceptance measurement



Use MC simulation of the Km2g decay within pnn1 or pnn2 or pnn12 trigger w/o online photon veto

Thresholds in BV and EC are 5 MeV and 20 MeV respectively. For $140 < p_{tot\mu} < 200$ MeV/c gamma energy $E > 20$ MeV