



Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»  
Институт Ядерной Физики и Технологий  
Кафедра Физики элементарных частиц (№40)  
Выпускная квалификационная работа бакалавра  
на тему

# Анализ мюонного фона в эксперименте DEAR-3600

Научный руководитель: Мачулин И.Н.

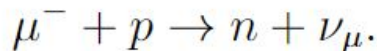
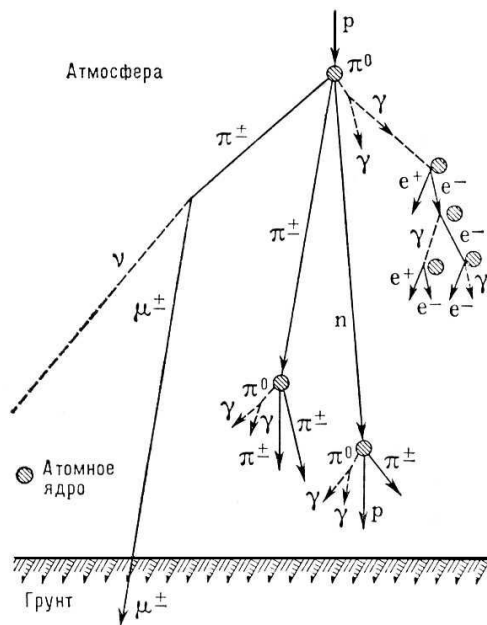
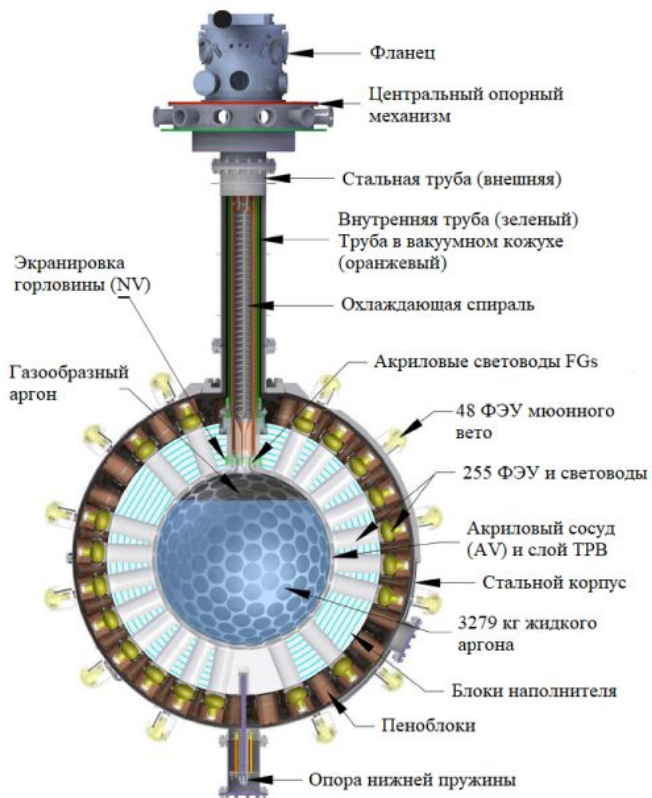
Научный консультант: Ильясов А.И.

Студент: Токарева П.С.

Москва 2023



# Эксперимент DEAP-3600



**Космогенные нейтроны** — нейтроны, рождающиеся при взаимодействии мюонов из атмосферы с элементами детектора и его окружением

## Цель работы:

оценка потока мюонов, достигающих подземной лаборатории SNOLAB с установкой DEAP-3600 для оценки фона от космогенных нейтронов

# Методы расчёта мюонного потока

- Экстраполяция ранних экспериментальных данных [1]:

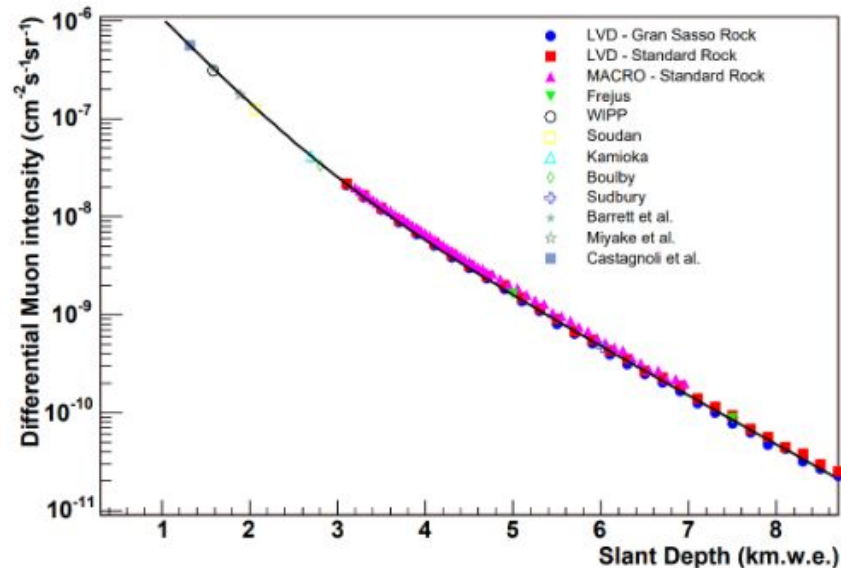
$$\Phi = (3.31 \pm 0.10) \cdot 10^{-10} \mu/cm^2/s$$

- Использование Depth-Intensity-Relation(DIR)[2]:

$$I(h) = (I_1 e^{-h/\lambda_1} + I_2 e^{-h/\lambda_2})$$

$$\Phi = (3.58 \pm 1.09) \cdot 10^{-10} \mu/cm^2/s$$

- MUTE (MUon inTensity codE) - это программный пакет для расчёта потока мюонов, долетающих через атмосферу и интенсивностей потока мюонов под землёй\*.
- Вычисление мюонного потока на основе данных, полученных из мюонного вето.

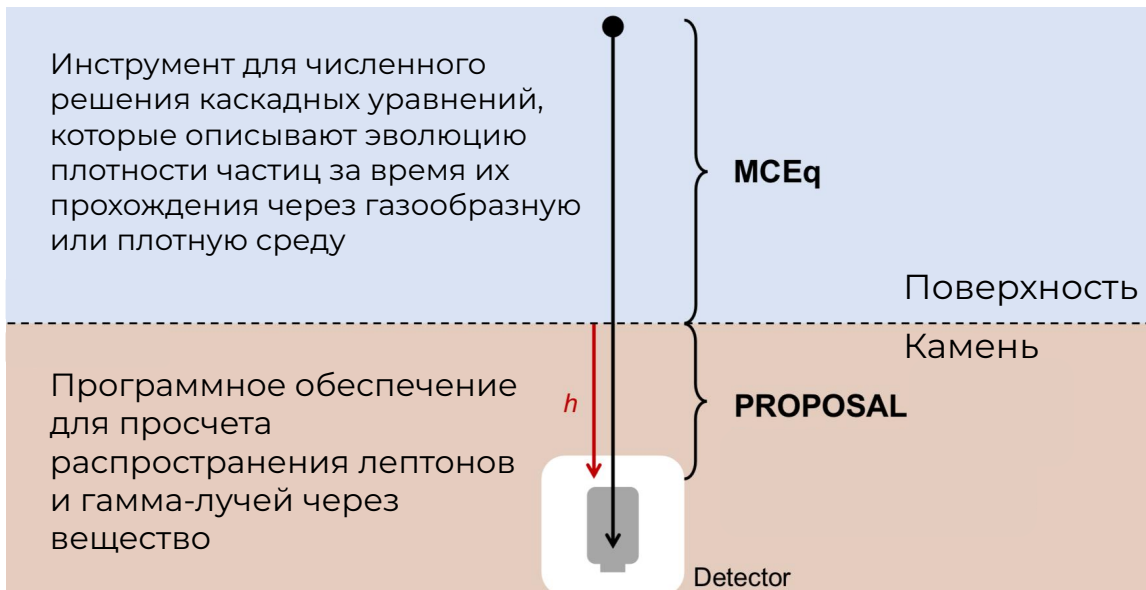


[1] B. Aharmim и др. «Measurement of the cosmic ray and neutrino-induced muon flux at the Sudbury neutrino observatory».

[2] D.-M. Mei and A. Hime, "Muon-Induced Background Study for Underground Laboratories"

\*Значение было посчитано мною в прошлом семестре.

# Как работает MUTE



Выбранные модели генерации КЛ

- GSF
- HG

Выбранные модели взаимодействия адронов с веществом

- SIBYLL 2.3c
- EPOS LHC

**Результаты:**

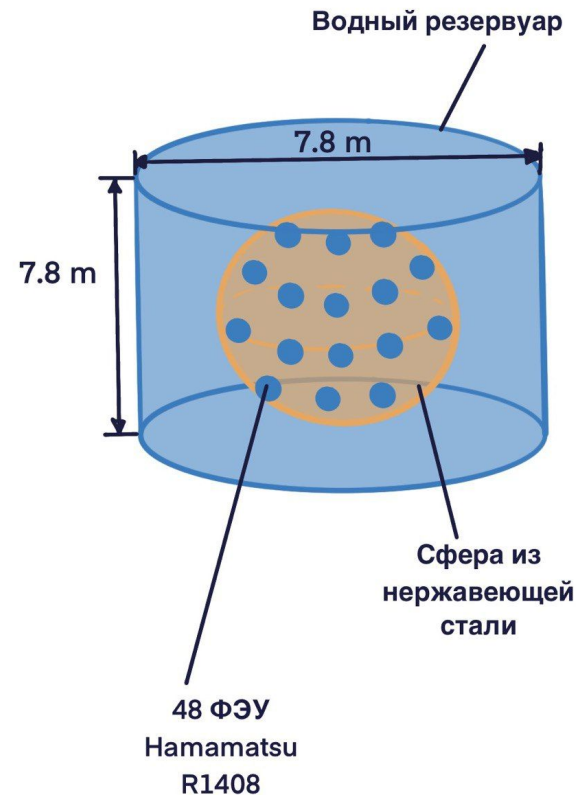
| Модели            | $\Phi \cdot 10^{-10} \mu/\text{см}^2/\text{сек}$ |
|-------------------|--|
| GSF & SIBYLL 2.3c | $4.18^{+0.08}_{-0.02}$                           |
| GSF & EPOS LHC    | $4.34^{+0.08}_{-0.02}$                           |
| HG & SIBYLL 2.3c  | $4.62^{+0.08}_{-0.02}$                           |
| HG & EPOS LHC     | $4.80^{+0.08}_{-0.02}$                           |
| Итог              | $4.5 \pm 0.3$                                    |

$$\Phi^u(E_j^u, X, \theta) = \sum_i \Phi^s(E_j^s, \theta_k) P(E_i^s, E_j^u, X) \left( \frac{\Delta E_j^s}{\Delta E_i^u} \right)$$

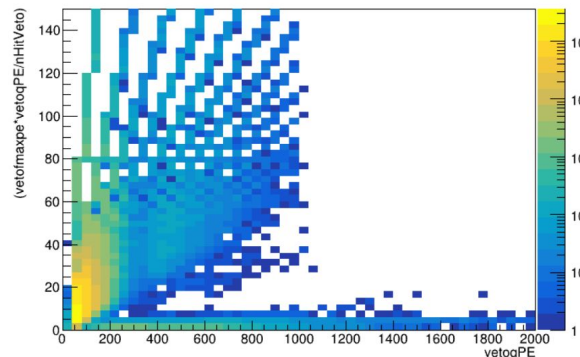
где  $\Phi_u$  — поток под землёй,  $\Phi_s$  — поток мюонов, достигающий поверхности (результат работы MCEq),  $P$  — тензор перемещения (результат работы PROPOSAL),  $\Delta E_u$  и  $\Delta E_s$  — ширина бина для энергии под землёй и на поверхности соответственно.

# Мюонное вето

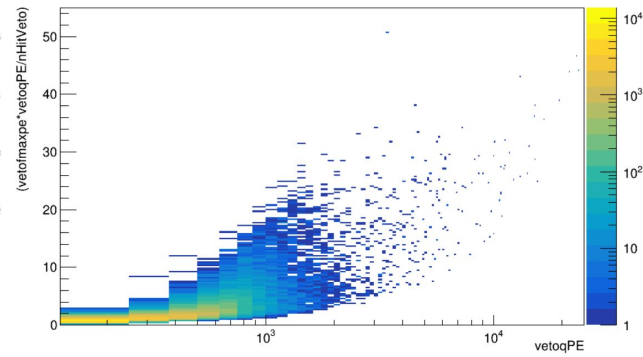
## Процесс обработки данных



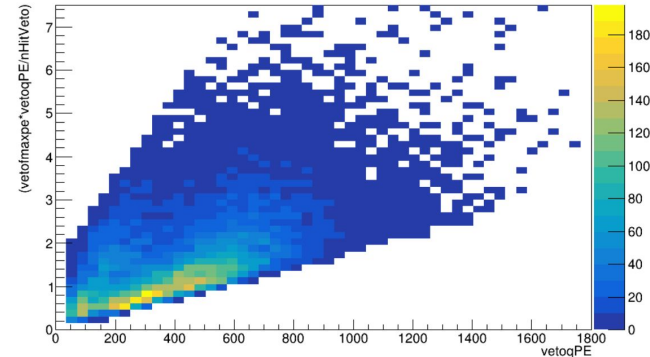
# Высокоуровневые критерии отбора и результат их применения



после LL



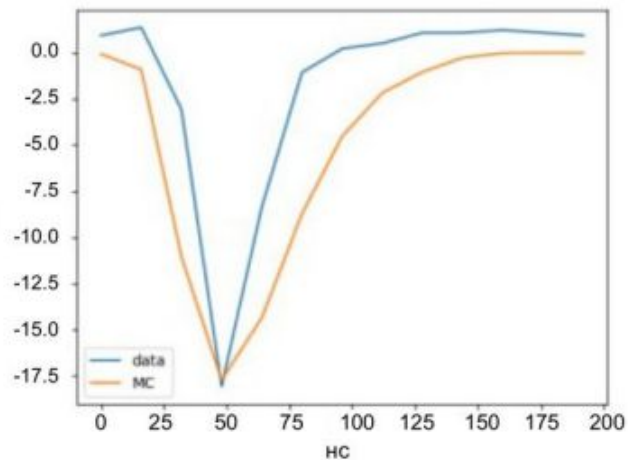
Монте Карло



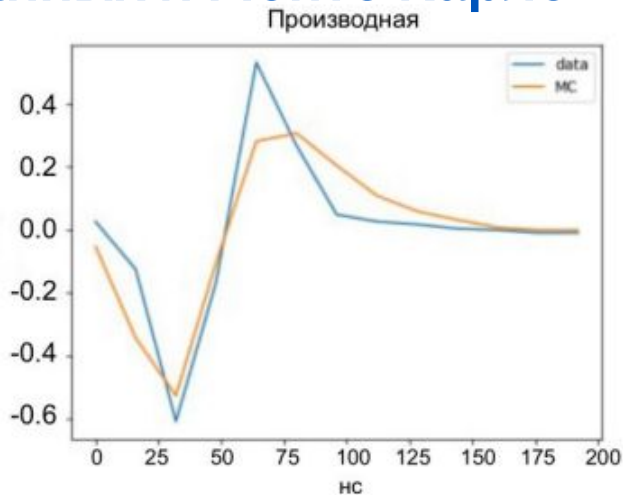
после HL

Частота попадания мюонов в veto после применения высокоуровневых критериев отбора составила **14.8 ± 0.2 мюон/день.**

# Сравнение сигналов с данными и Монте Карло

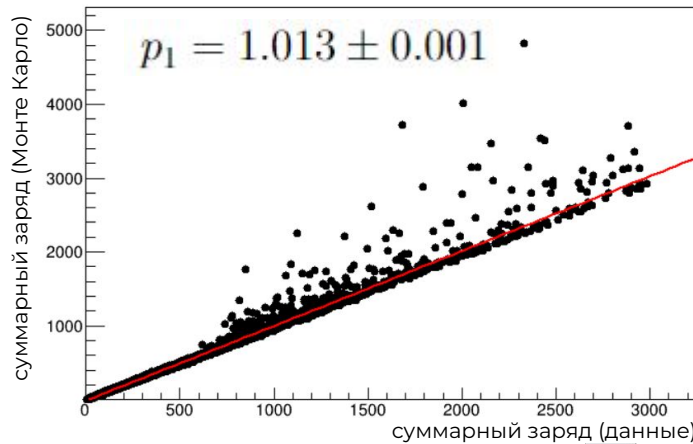
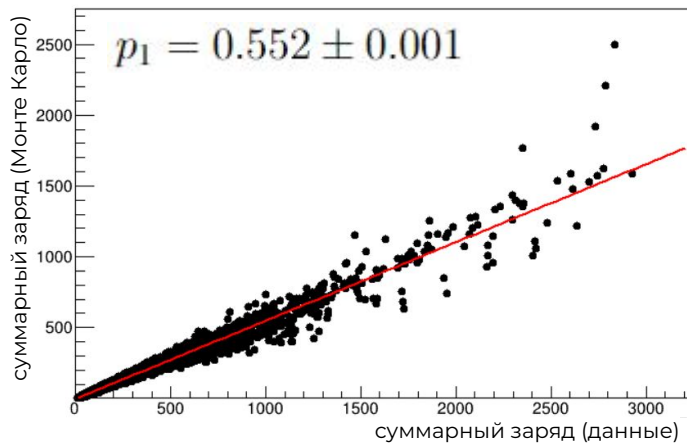


До введения поправочного коэффициента



После введения поправочного коэффициента

Для устранения несоответствия форм сигнала вводился поправочный коэффициент для световых выходов.



Аппроксимация прямой:

$$y = p_0 + p_1 \cdot x$$

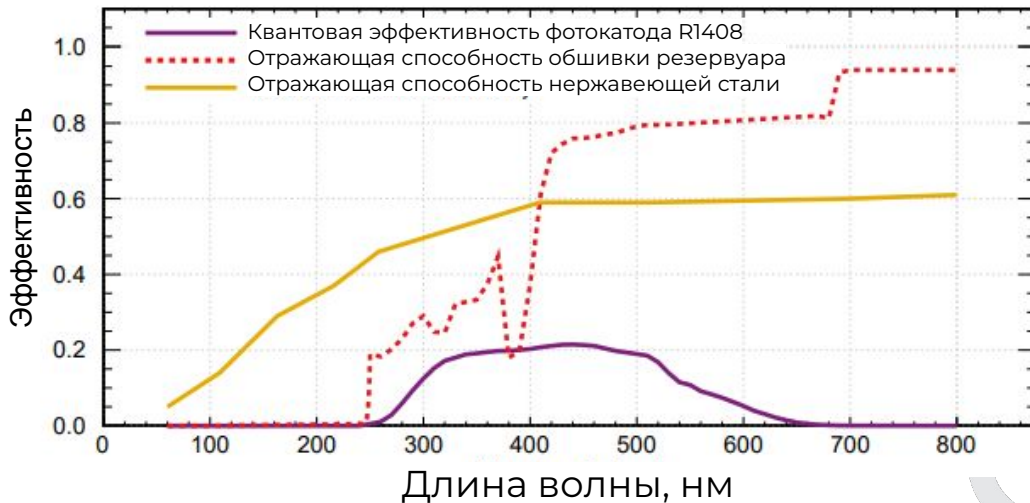


# Настройка оптической модели в пакете Монте Карло

Оптические параметры:

- средний пробег фотона в среде (ABSL);
- отражающая способность нержавеющей стали;
- отражающая способность обшивки резервуара (TL);
- квантовая эффективность фотокатода (QE).

Для настройки также менялся порог (thresh)

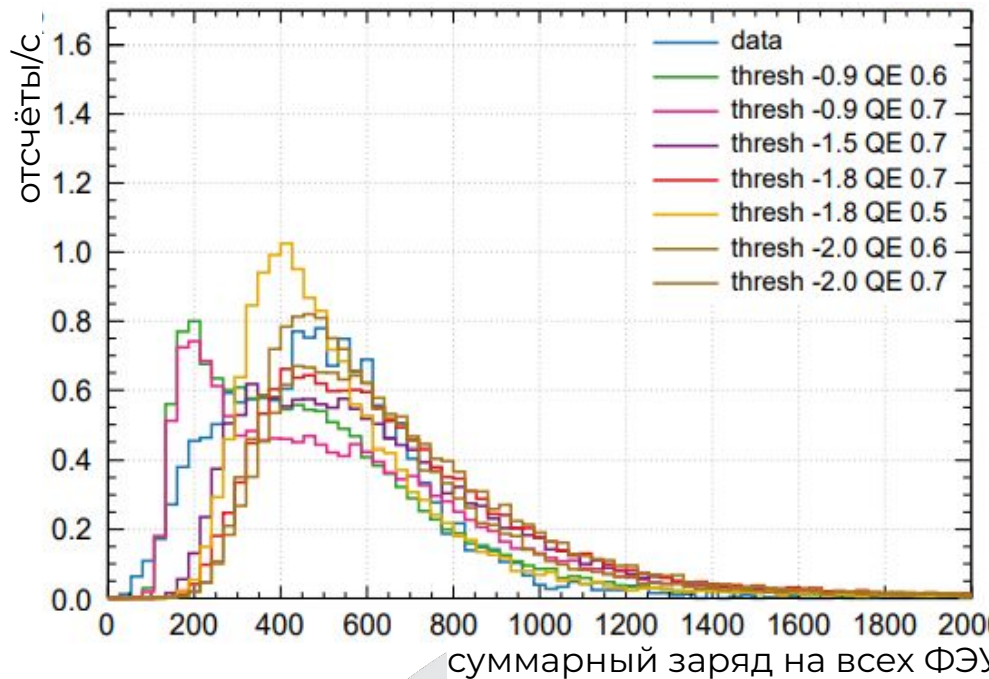




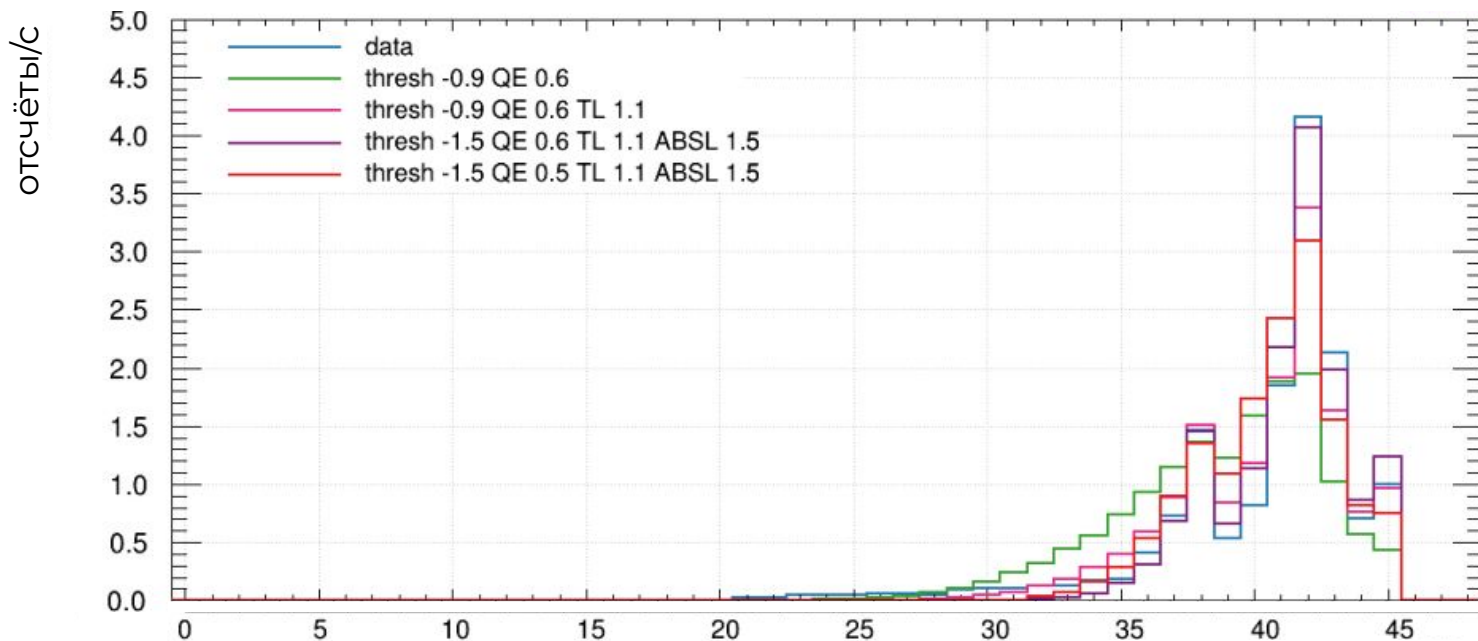
# Настройка оптической модели в пакете Монте Карло

Наблюдаются следующие закономерности:

- увеличение QE ведёт к смещению пика собранного заряда в большую сторону, а также пик  $f_{max}$ ре смещается в меньшую сторону;
- увеличение TL позволяет собирать больше света и рассеивать его => спектр  $f_{max}$ ре смещается в сторону более низких значений,  $n_{HitVeto}$  насыщен до числа активных ФЭУ,  $qPE$  смещается в сторону более высоких значений;
- изменение ABSL, кажется, не влияет на спектры значительно;
- увеличение  $threshold$  ведёт к смещению пика  $qPE$  в сторону более высоких значений,  $var\_prime$  смещается в противоположную сторону, пик  $n_{HitVeto}$  становится более ярко выраженным;  $f_{max}$ ре не меняется.



# Оценка эффективности



| Набор параметров                   | $\varepsilon$          |
|------------------------------------|------------------------|
| thresh -0.9 QE 0.6                 | 0.65                   |
| thresh -0.9 QE 0.6 TL 1.1          | 0.67                   |
| thresh -1.5 QE 0.6 TL 1.1 ABSL 1.5 | 0.53                   |
| thresh -1.5 QE 0.5 TL 1.1 ABSL 1.5 | 0.47                   |
| Результат                          | $0.58^{+0.09}_{-0.11}$ |

число сработавших ФЭУ

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{отбор}}}{N_{\text{общ}}}$$

# Расчёт мюонного потока

Частота попадания мюонов в вето с учетом эффективности:

$$25.7 \pm 0.3_{\text{стат}}^{+5.8} \pm 3.5_{\text{сист}} \text{ мюон/день}$$

Результирующее значение потока было рассчитано по формуле:

$$\Phi = \frac{R_{obs}}{A_{eff}}$$

где  $R_{obs}$  — число попадающих каждый день в вето мюонов;

$A_{eff}$  — эффективная площадь поперечного сечения равная  $64 \pm 2 \text{ м}^2$

**SNO [1]**  $\Phi = (3.31 \pm 0.10) \cdot 10^{-10} \text{ мюон/см}^2/\text{с}$

**DEAP**

|  | DIR             | MUTE          | Мюонное вето   |
|--|-----------------|---------------|--|
| $\Phi \cdot 10^{-10} \text{ мюон/см}^2/\text{с}$ | $3.58 \pm 1.09$ | $4.5 \pm 0.3$ | $4.62 \pm 0.05_{\text{стат}}^{+1.04} \pm 0.64_{\text{сист}}$ |

# Заключение

Цель данной работы заключалась в изучении различных методов оценки потока мюонов, долетающих до подземной лаборатории DEAP3600. В соответствии с целями в ходе работы:

- вычислена величина потока мюонов с использованием **Depth-IntensityRelation**, которая составила

$$\Phi_{\text{DIR}} = (3.58 \pm 1.09) \cdot 10^{-10} \mu/\text{см}^2/\text{сек};$$

- изучена работа программного пакета **MUTE**, проанализированы и выбраны модели генерации космических лучей и модели взаимодействия адронов с учётом их применимости для оценки мюонного потока. С помощью этого пакета и выбранных моделей был вычислен поток, величина которого составила

$$\Phi_{\text{MUTE}} = (4.5 \pm 0.3) \cdot 10^{-10} \mu/\text{см}^2/\text{сек};$$

- выбраны **критерии отбора** для данных из мюонного вето;
- проведена оценка **эффективности регистрации мюонов** в мюонном вето, которая составляет

$$\varepsilon = 0.58_{-0.11}^{+0.09};$$

- с учётом выбранных критериев отбора и эффективности вычислена **величина мюонного потока на основе данных из мюонного вето**, которая составила

$$\Phi_{\text{MV}} = (4.62 \pm 0.05_{\text{стат}}^{+1.04}_{-0.64_{\text{сист}}}) \cdot 10^{-10} \mu/\text{см}^2/\text{сек}.$$

Полученные расчетные значения потоков согласуются друг с другом в рамках погрешностей.

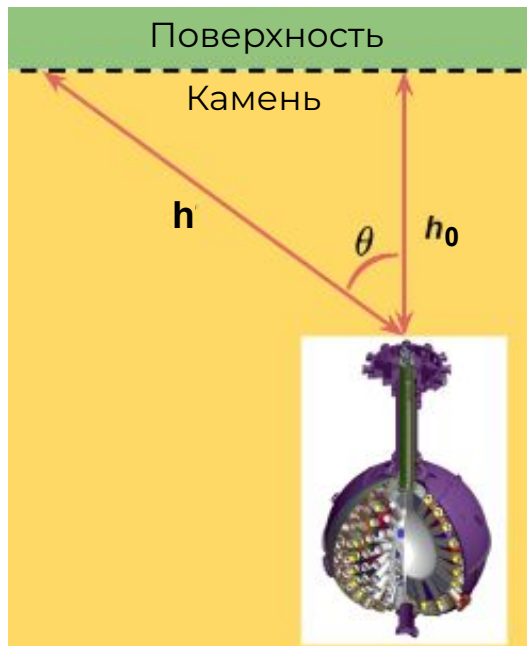


## Дополнительные слайды

# Depth-Intensity-Relation(DIR)

DIR описывает зависимость дифференциальной интенсивности потока мюонов от глубины под углом:

$$I(h) = (I_1 e^{-h/\lambda_1} + I_2 e^{-h/\lambda_2})$$



Параметры определяются из аппроксимации экспериментальных данных:

| Параметр    | Значение  |
|-------------|---|
| $I_1$       | $(8.60 \pm 0.53) * 10^{-6} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$ |
| $\lambda_1$ | $(0.46 \pm 0.01) \text{ км (высота над уровнем моря)}$                  |
| $I_2$       | $(0.44 \pm 0.06) * 10^{-6} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$ |
| $\lambda_2$ | $(0.87 \pm 0.02) \text{ км (высота над уровнем моря)}$                  |

Для нахождения полного потока:

замена:

$$h = \frac{h_0}{\sin\theta} = h_0 \cdot \text{sec}\theta$$

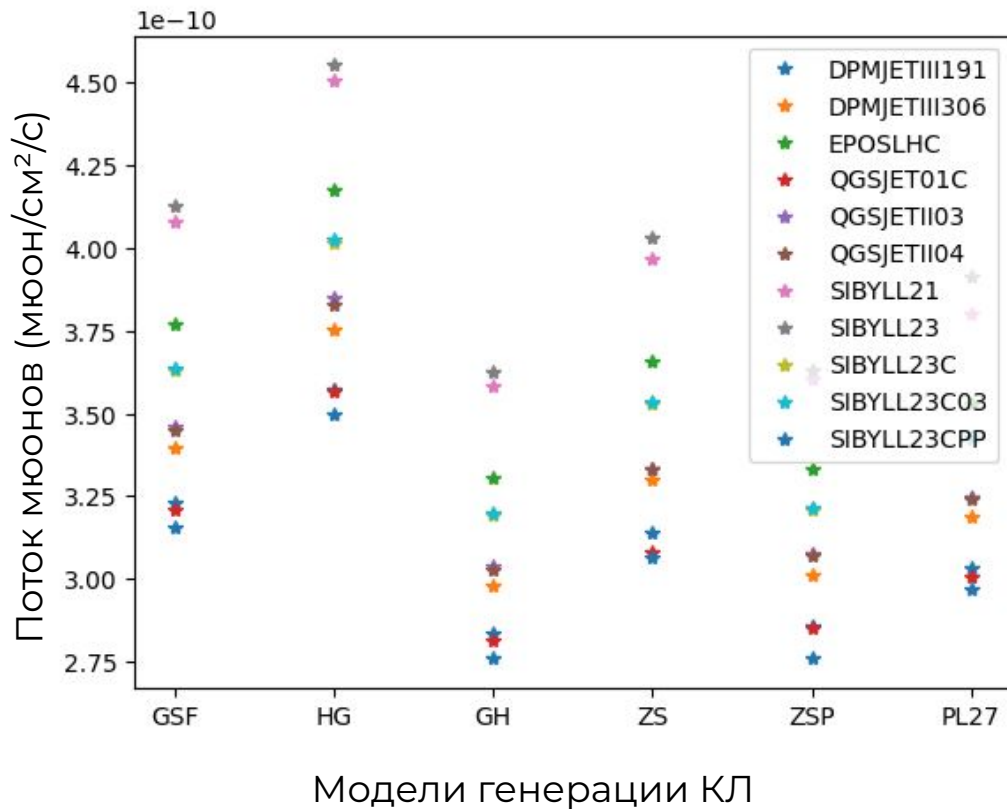
где  $h_0$  - глубина нахождения лаборатории.

Интегрирование по  $\theta$  по верхней полусфере

В результате получаем:

$$\Phi = 67.97 \cdot 10^{-6} e^{-h_0/0.285} + 2.071 \cdot 10^{-6} e^{-h_0/0.698} \text{ МЮОН/см}^2/\text{с}$$

# Выбор моделей взаимодействия для MCEq



## Модели генерации КЛ:

- GSF, так как показывает наиболее близкие к данным результаты;
- HG, так как работает в наибольшем диапазоне энергий.

## Модели взаимодействия адронов с веществом:

- SIBYLL 2.3c за наиболее точное описание для воздушных ливней и высокую актуальность теоретических внедрений;
- EPOS LHC за наиболее высокое соответствие данным среди оставшихся моделей.



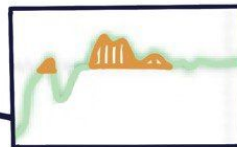
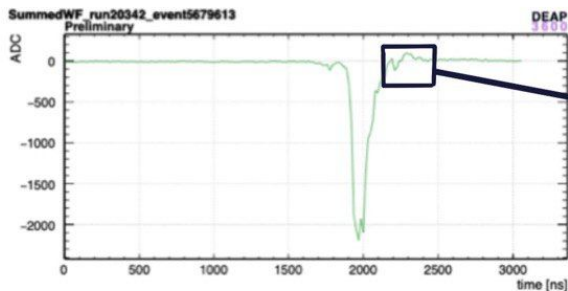
# Параметры, использованные для отбора данных

1. **vetoqPE** - число фотоэлектронов, зарегистрированных в ФЭУ за одно событие;
2. **vetofmaxPE** - доля суммарного заряда, собранного со всех ФЭУ, от максимально возможного значения суммарного заряда;
3. **vetoOverShoot** - проинтегрированное количество заряда (АЦП\*нс) для суммированного со всех ФЭУ сигнала, который находится выше базовой линии. Сигналы в вето должны быть отрицательными, а отклонение в положительную сторону не должно быть большим;
4. **nHitVeto** - число ФЭУ использованных в формировании сигнала события.
5. **(vetofmaxpe · vetoqPE/nHitVeto)** - усредненное значение заряда, собранного всеми ФЭУ за одно событие.

# Низкоуровневые критерии отбора (Low level cuts)

Ограничения на параметры, выбранные на первом этапе работы:

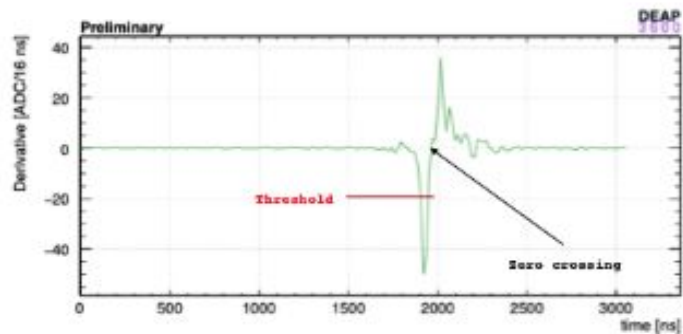
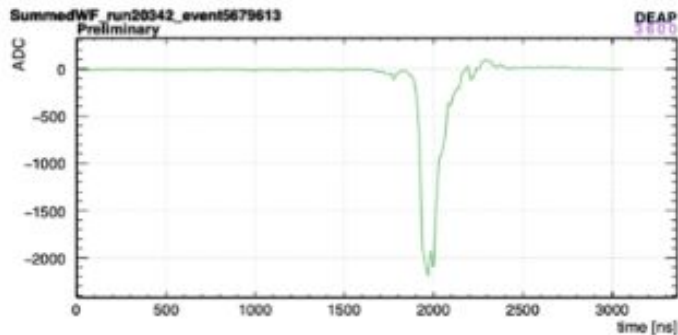
- Нижнее ограничение на амплитуду суммарного сигнала со всех ФЭУ ( $\text{vetoqPE} > 6$ ) - чтобы отсечь низкоэнергетичные события;
- Ограничение на превышение суммированным сигналом базовой линии ( $\text{vetoOverShoot} < 2000$ );
- $\text{foundVetoEvent} == 1$  - флаг, который отражает факт срабатывания вето.



vetoOverShoot - часть сигнала, находящаяся выше базовой линии, проинтегрированная по времени

# foundVetoEvent

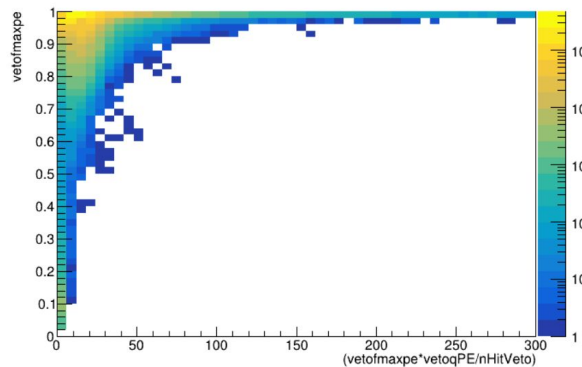
При анализе первой производной суммированного сигнала было обнаружено, что для шума её значение никогда не превышает  $\sim -20$  ADC/16ns



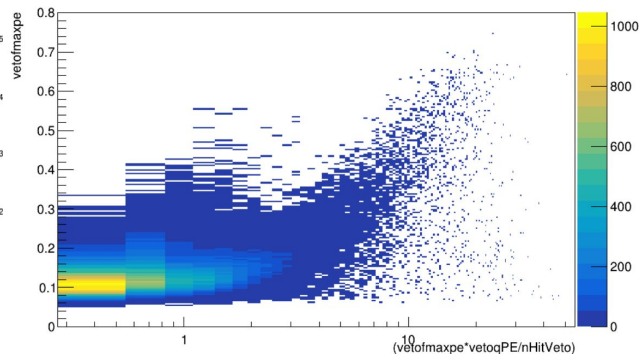
Пример формы сигнала полученного с вето (слева) и его первой производной (справа)

# Распределения по параметрам

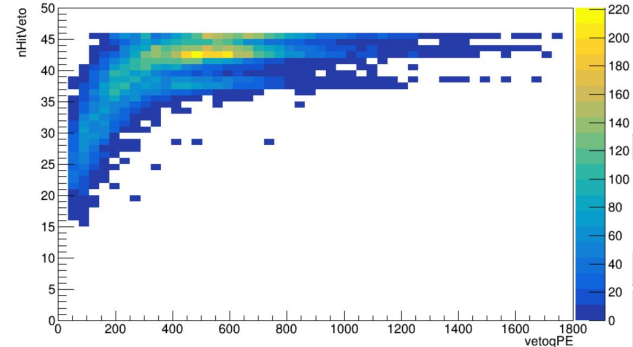
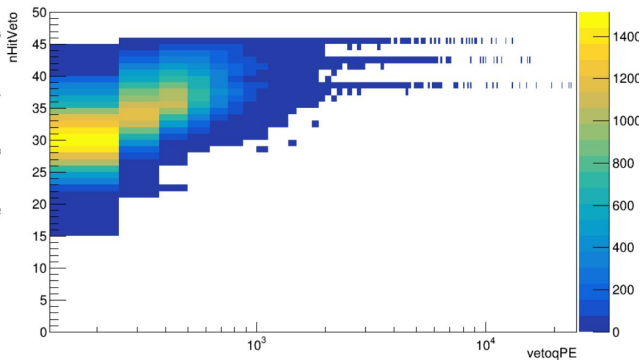
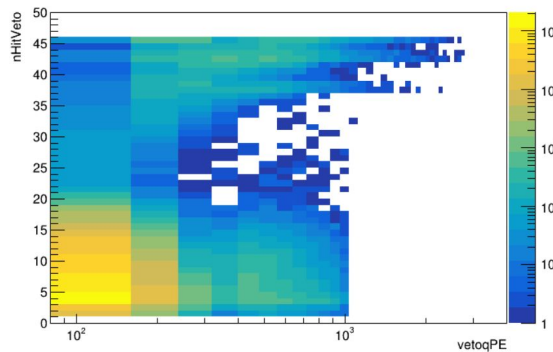
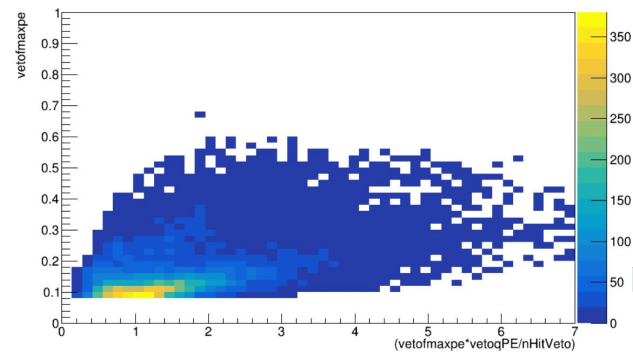
LL cuts



Монте Карло



HL cuts

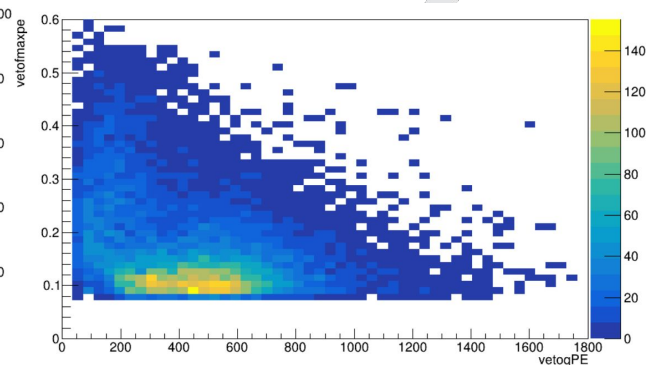
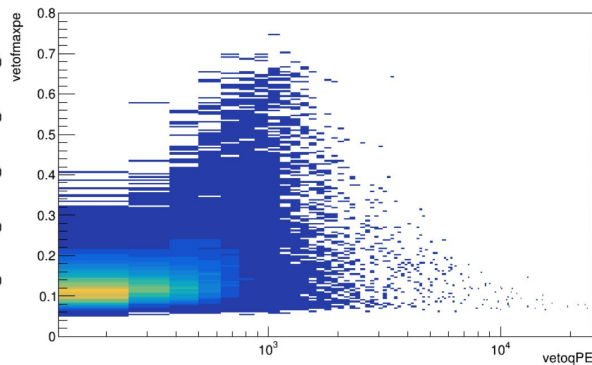
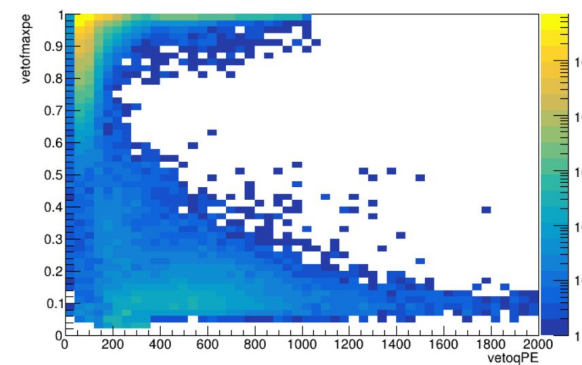
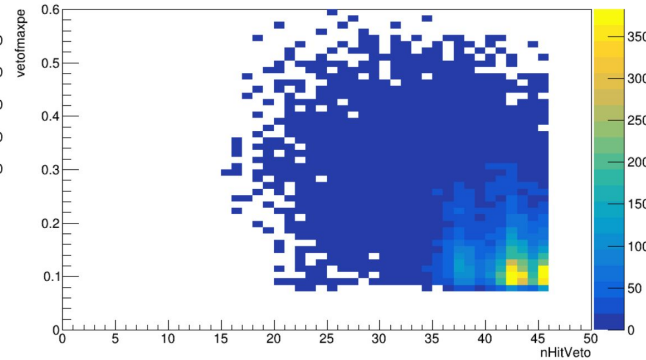
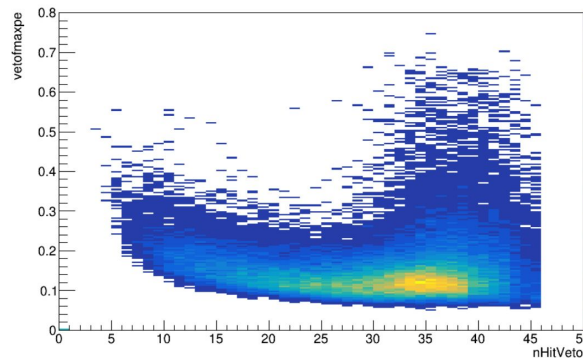
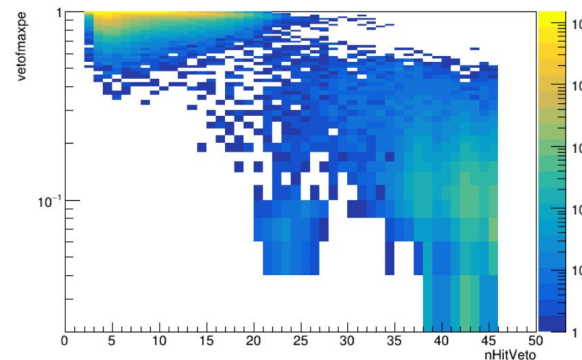


# Распределения по параметрам

LL cuts

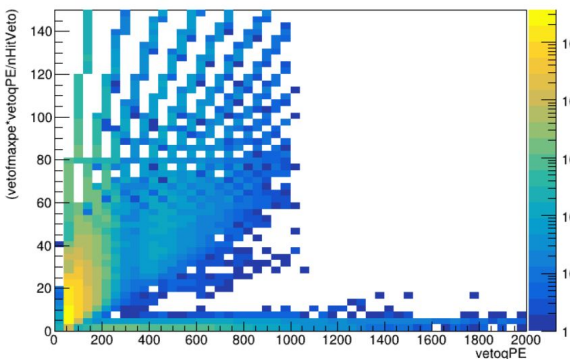
Монте Карло

HL cuts

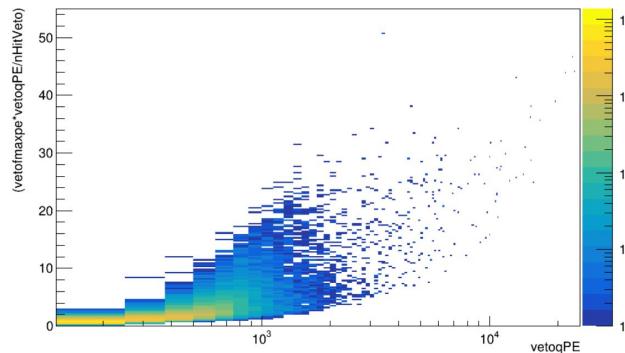


# Высокоуровневые критерии отбора и результат их применения

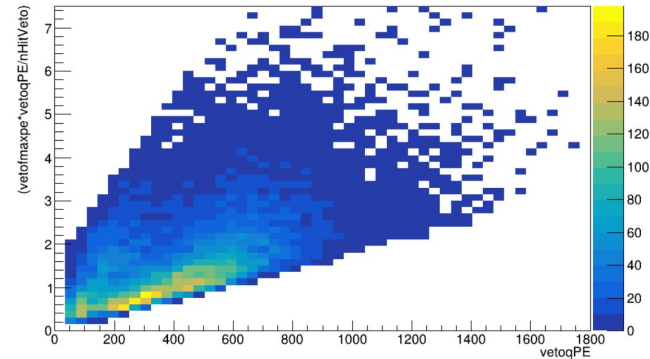
1. Ограничение на превышение суммированным сигналом базовой линии ( $\text{vetoOverShoot} < 1000$ );
2. Нижнее ограничение на амплитуду суммарного сигнала со всех ФЭУ ( $\text{vetoqPE} > 50$ ) - чтобы отсеять низкоэнергетичные события;
3. Ограничение на долю суммарного заряда, собранного со всех ФЭУ, от максимально возможного значения суммарного заряда ( $\text{vetofmaxpe} > 0.08$ );
4. Ограничение на среднюю энергию, собранную одним ФЭУ, участвующем в формировании сигнала;
5.  $\text{isInstrumental} == 0$  - специально введенная переменная для отслеживания событий, связанных со сбоем электроники.



после LL



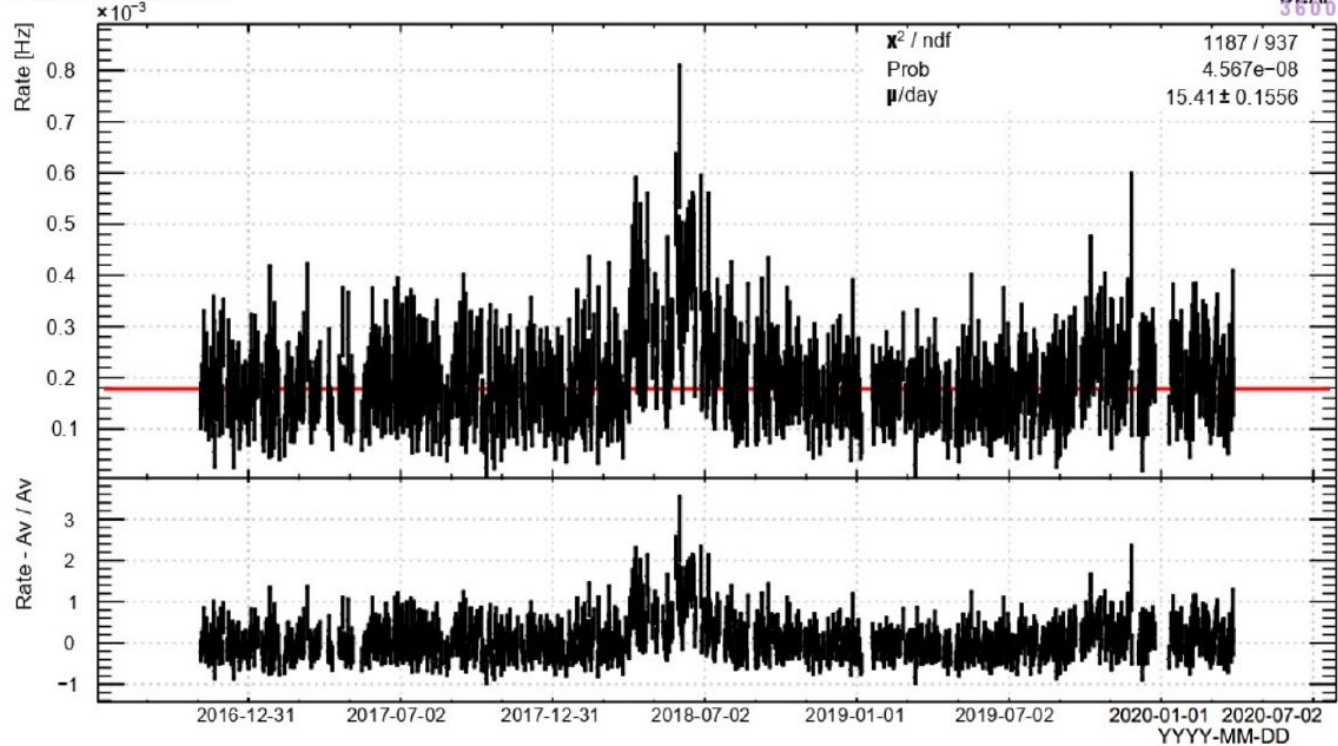
Монте Карло



после HL

# Частота попадания мюонов в вето до применения высокоуровневых критериев отбора

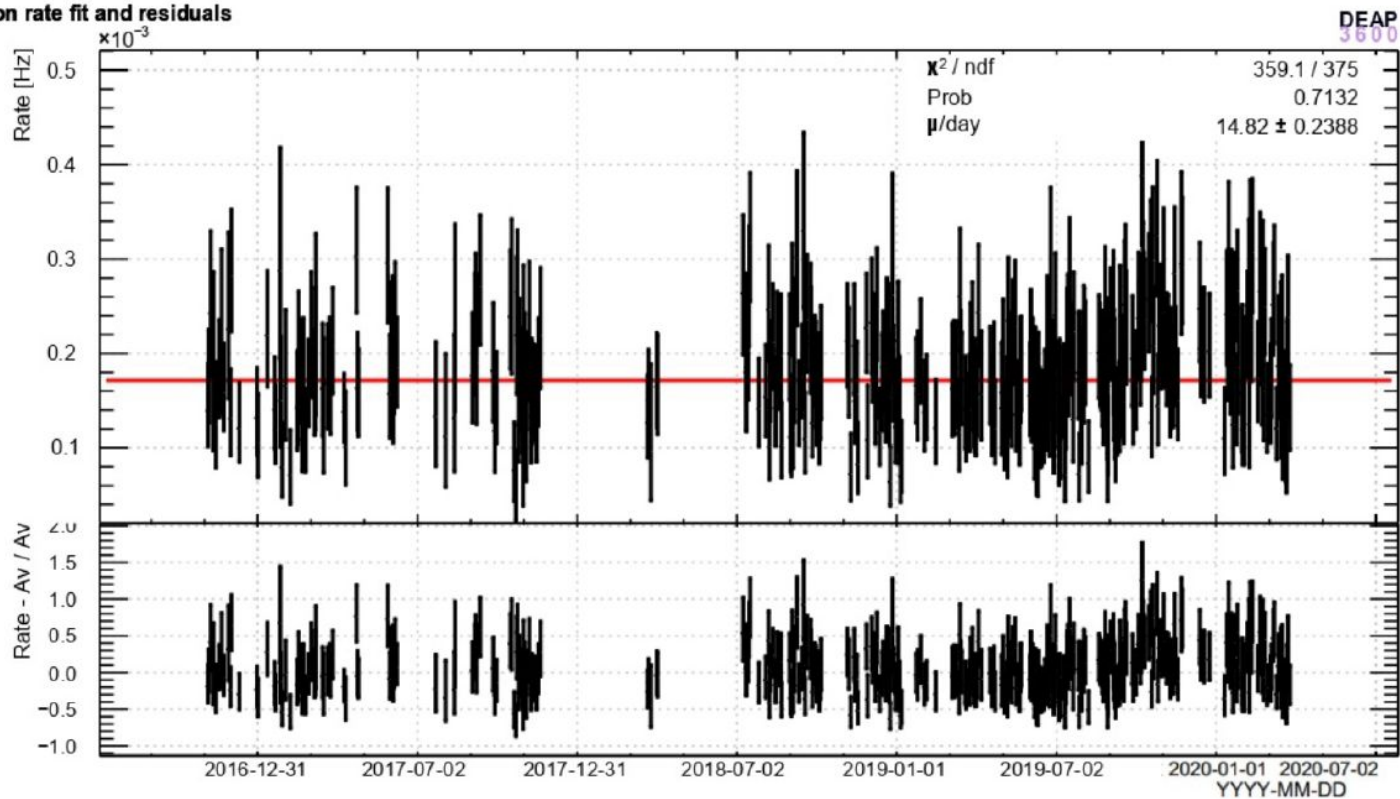
Muon rate fit and residuals





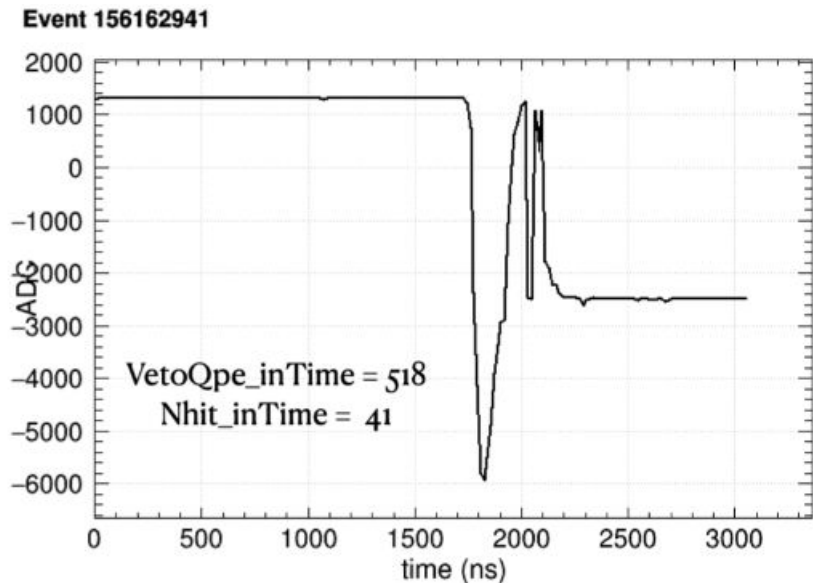
# Частота попадания мюонов в вето после применения высокоуровневых критериев отбора

Muon rate fit and residuals



# isInstrumental

Выход на плато — событие, при котором в ФЭУ попадает более 1000 фотоэлектронов.



Одна из причин — попадание мюона в фотоумножитель, которое вызывает сильных разряд. Вероятность такого события составляет  $\sim 1.1\%$ , что не сравнимо с измеренным числом таких событий.

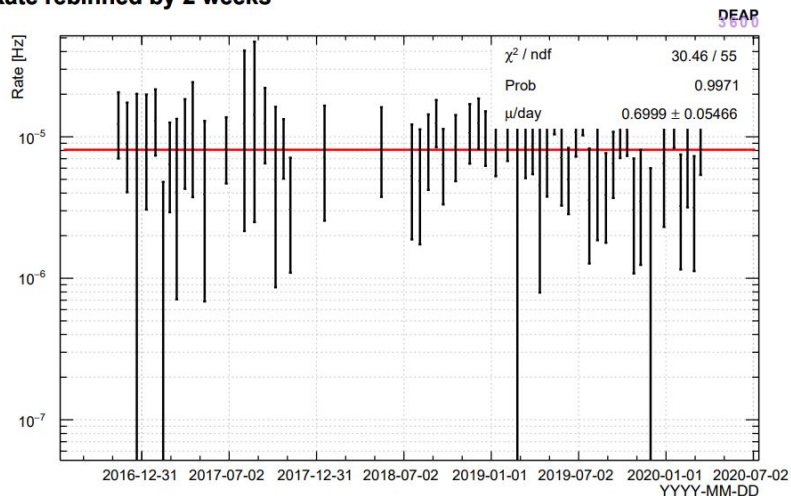
Для маркировки таких событий была введена переменная is Instrumental.

# Проверка правильности выбора ограничений на параметры

Высокоэнергетичные мюоны могут бы с одинаковой эффективностью детектированы в мюонном вето и в жидком аргоне. Это может быть использовано для проверки выбраннi ограничений.

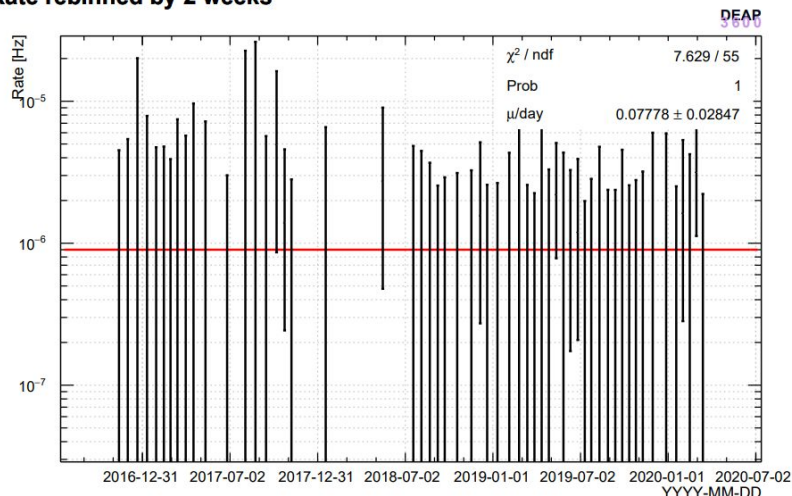
|   | $\mu/\text{день}$               |
|---|---------------------------------|
| Все ограничения   | $0.69 \pm 0.05$                 |
| $\text{vetoOvershoot} > 1000$   | $0.09 \pm 0.03$                 |
| $\text{vetoqPE} < 50$   | $(1.32 \pm 0.08) \cdot 10^{-5}$ |
| $\text{vetofmaxpe} < 0.08$  | $0.08 \pm 0.03$                 |
| $(\text{vetofmaxpevetoqPE}/\text{nHitVeto}) > (0.01\text{vetoqPE} + 1.4)$ | $0.014 \pm 0.037$               |

Rate rebinned by 2 weeks



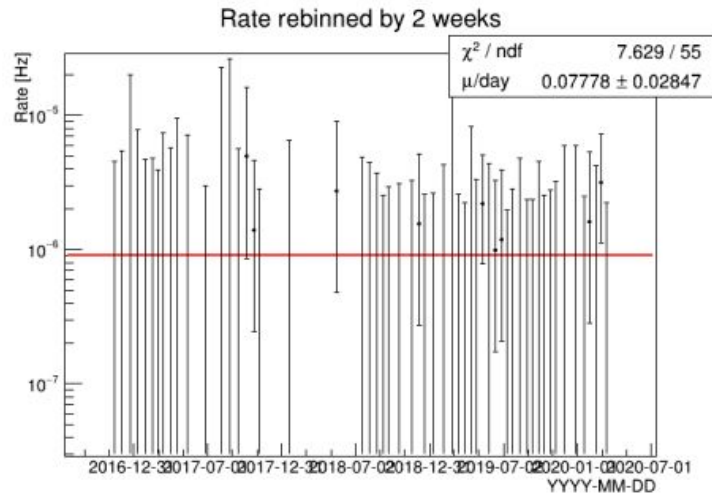
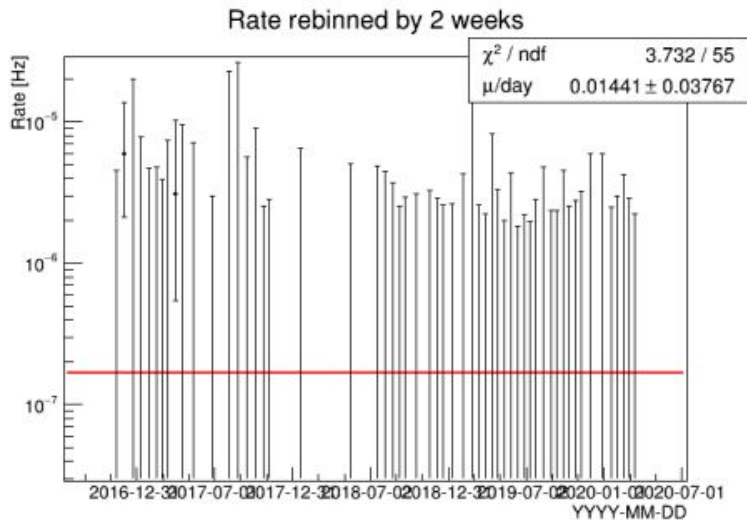
Частота совпадений при применении всех ограничений.

Rate rebinned by 2 weeks



Частота совпадений при инвертировании одного из ограничений ( $f_{\text{maxpe}} < 0.08$ ).

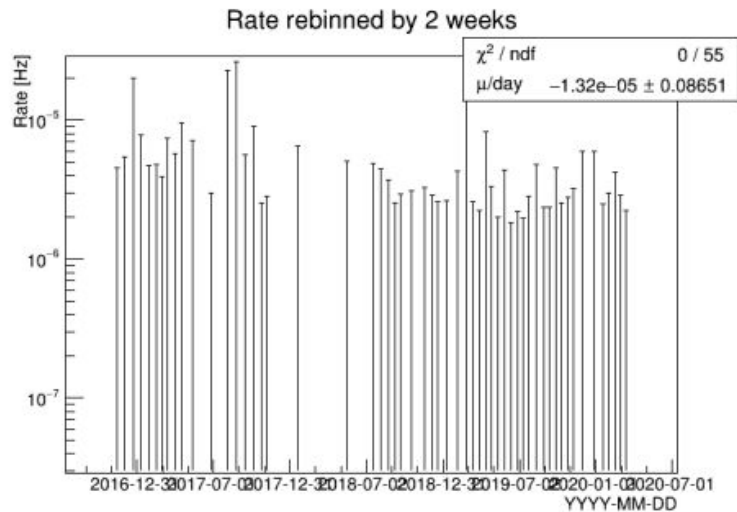
# Проверка правильности выбора критериев отбора



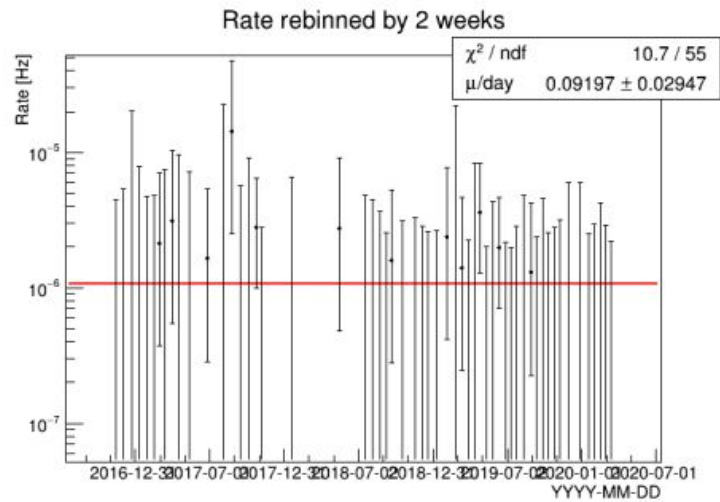
$$(\text{vetofmaxpe} \cdot \text{vetoqPE}/\text{nHitVeto}) > (0.01 \cdot \text{vetoqPE} + 1.4)$$

$$\text{fmaxpe} < 0.08$$

# Проверка правильности выбора критериев отбора



vetoqPE < 50



vetoOvershoot > 1000

## Настройка оптической модели в пакете Монте Карло

На МС были реконструированы события с 200 мюонами для каждого ФЭУ для каждого из пробегов. После применения всех критериев спектр для каждой величины в каждом пробеге был отнормирован за счёт масштабирующего фактора:

$$\text{scale\_factor}_i = iRT / \text{TOT\_RT},$$

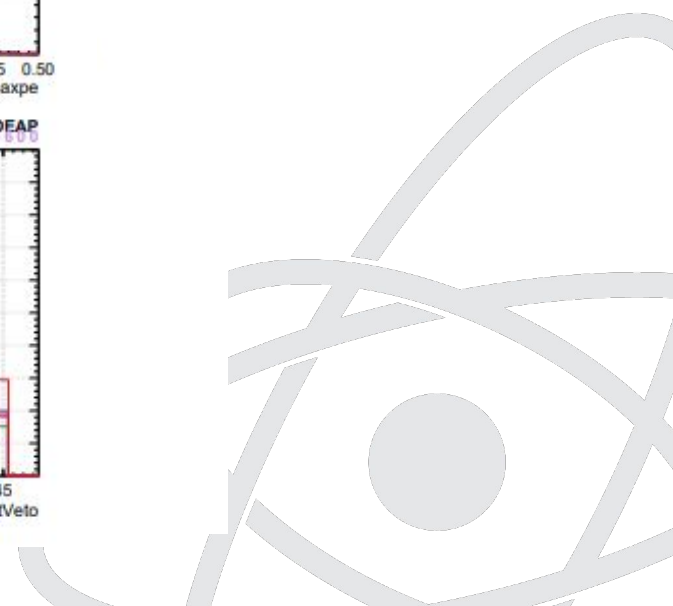
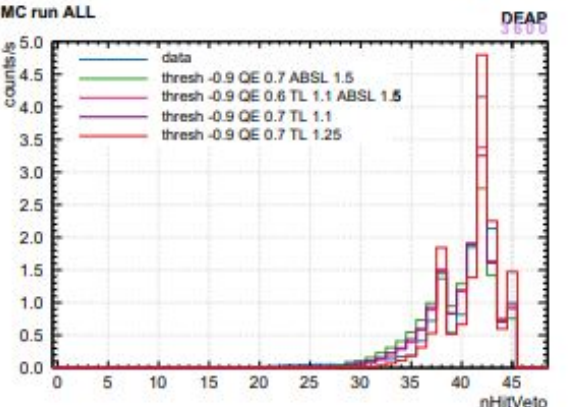
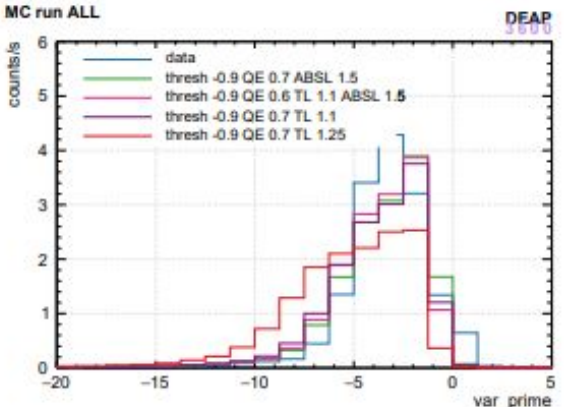
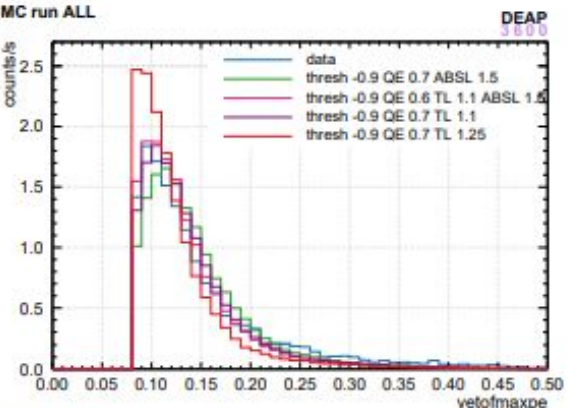
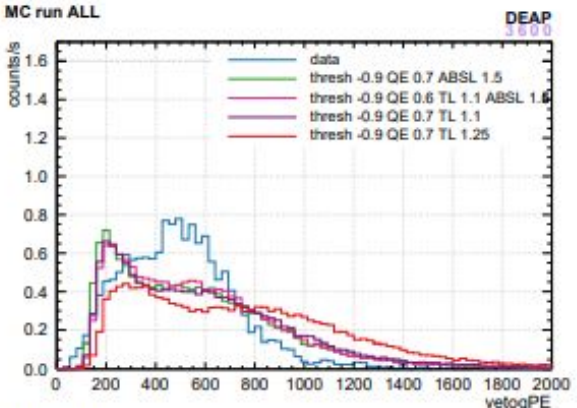
где  $iRT$  - длительность  $i$ -го пробега,  $\text{TOT\_RT}$  - суммарная длительность всех пробегов. Полный спектр получен сложением гистограмм после нормализации.

Далее спектры для всех пробегов были просуммированы и поделены на коэффициент нормировки:

$$\text{norm\_factor} = \sum_i N_i \cdot \frac{iRT}{\text{TOT\_RT}},$$

где  $N_i$  - число событий прошедших все критерии отбора в  $i$ -ом пробеге.

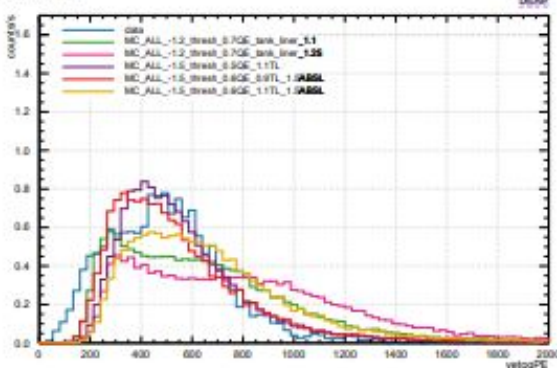
# Настройка оптической модели в пакете Монте Карло



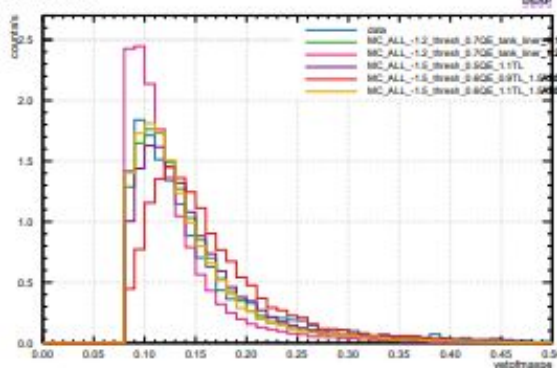


# Настройка оптической модели в пакете Монте Карло

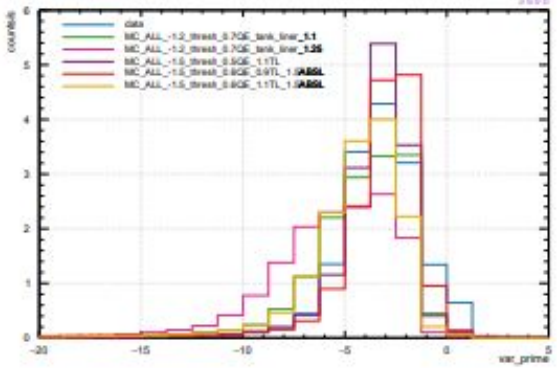
MC run ALL



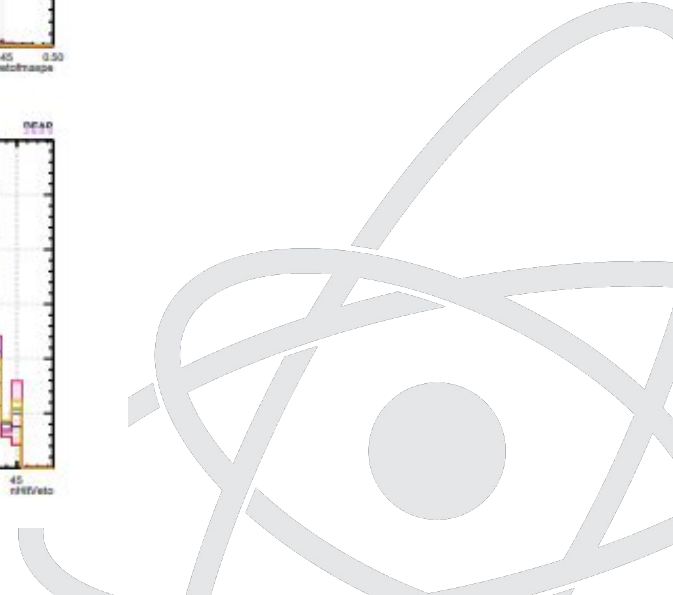
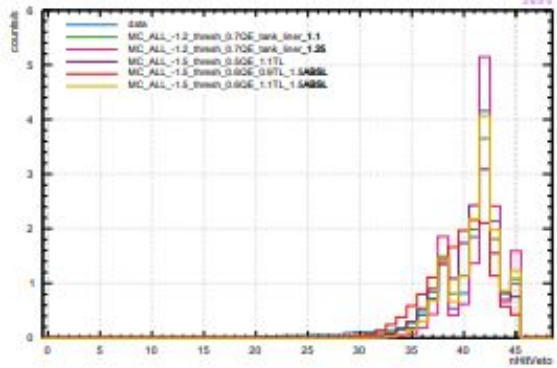
MC run ALL



MC run ALL



MC run ALL



# Настройка оптической модели в пакете Монте Карло

