



Физический факультет
Московского
государственного университета
имени М.В.Ломоносова

Исследование оптического модуля эксперимента Baikal-GVD и моделирование его сигнала на примере отклика от атмосферных мюонов

Выполнил: Зубченко Д.В.

Научный руководитель: Наумов Д.В.

Научный консультант: Завьялов С.И.



План

- Характеристики оптических модулей
- Атмосферные мюоны
- Триггер





Характеристики оптических модулей



ФЭУ Hamamatsu R7081-100

Спектральная чувствительность	300 нм — 600 нм
Длина волны максимальной эффективности	420 нм
Материал фотокатода	Двухщёлочной (Bialkali)



Характеристики оптических модулей

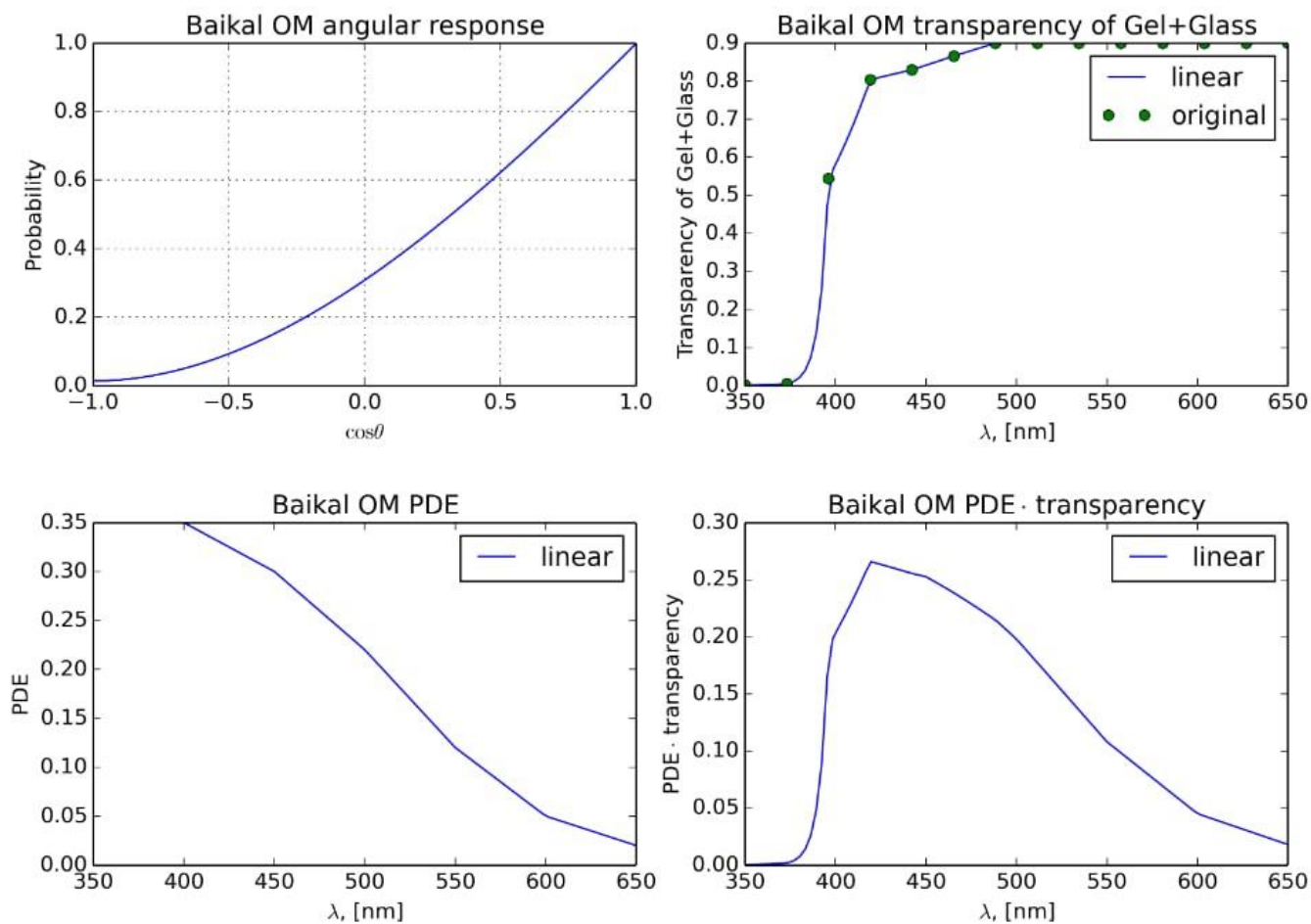


Рис.1 Характеристики ОМ

Зависимость отклика ОМ от угла падения фотонов

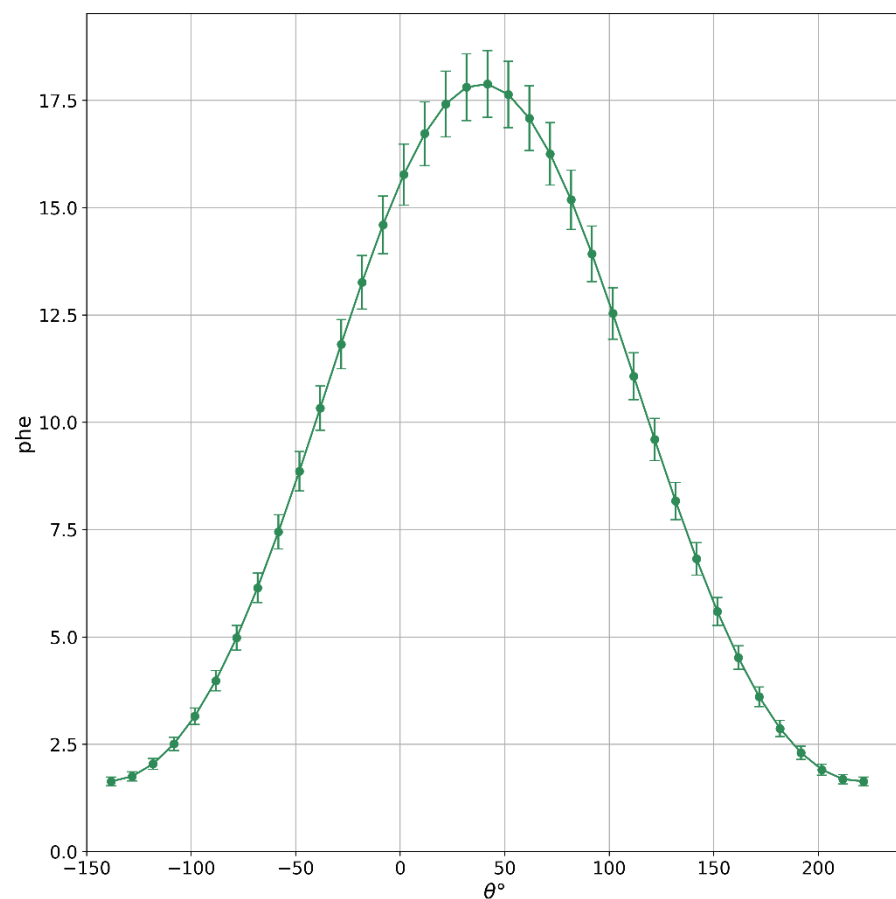
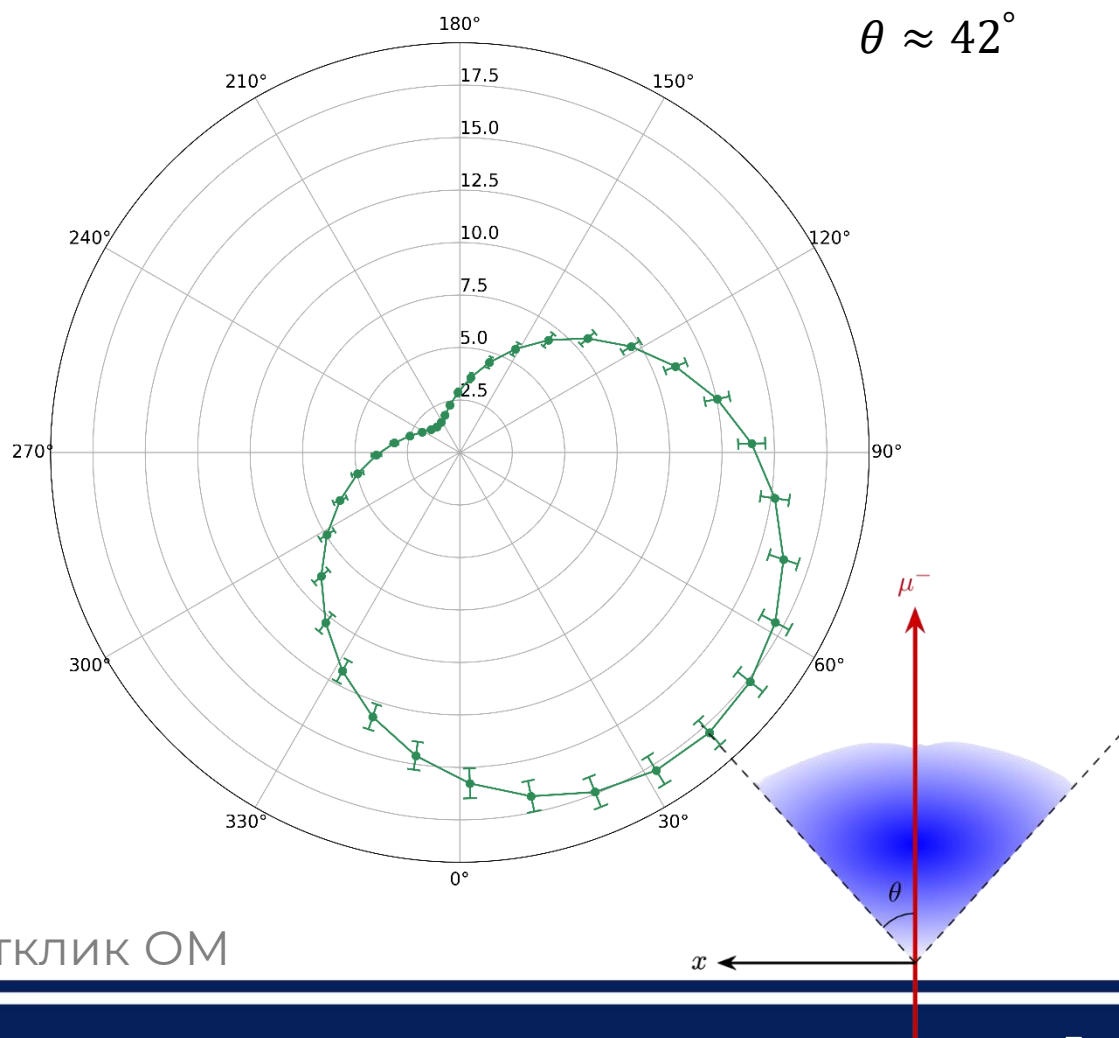


Рис. 2 Угловой отклик ОМ



Зависимость отклика ОМ от расстояния до трека мюона

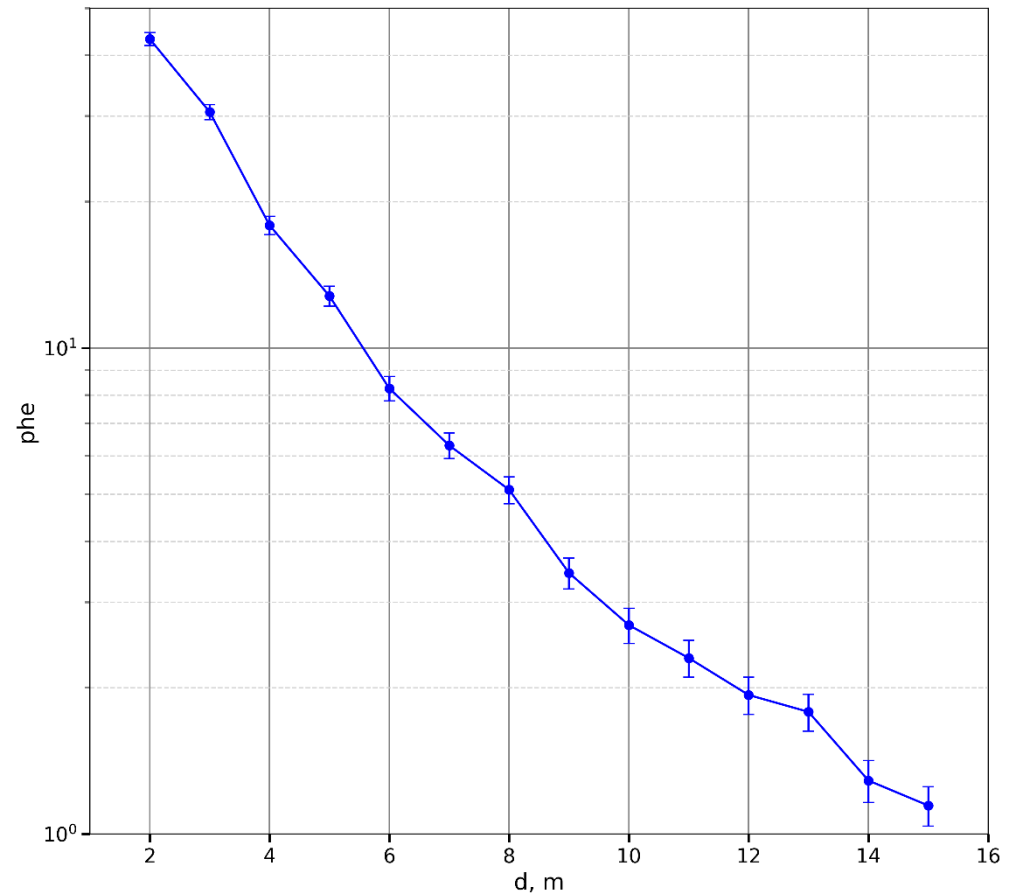
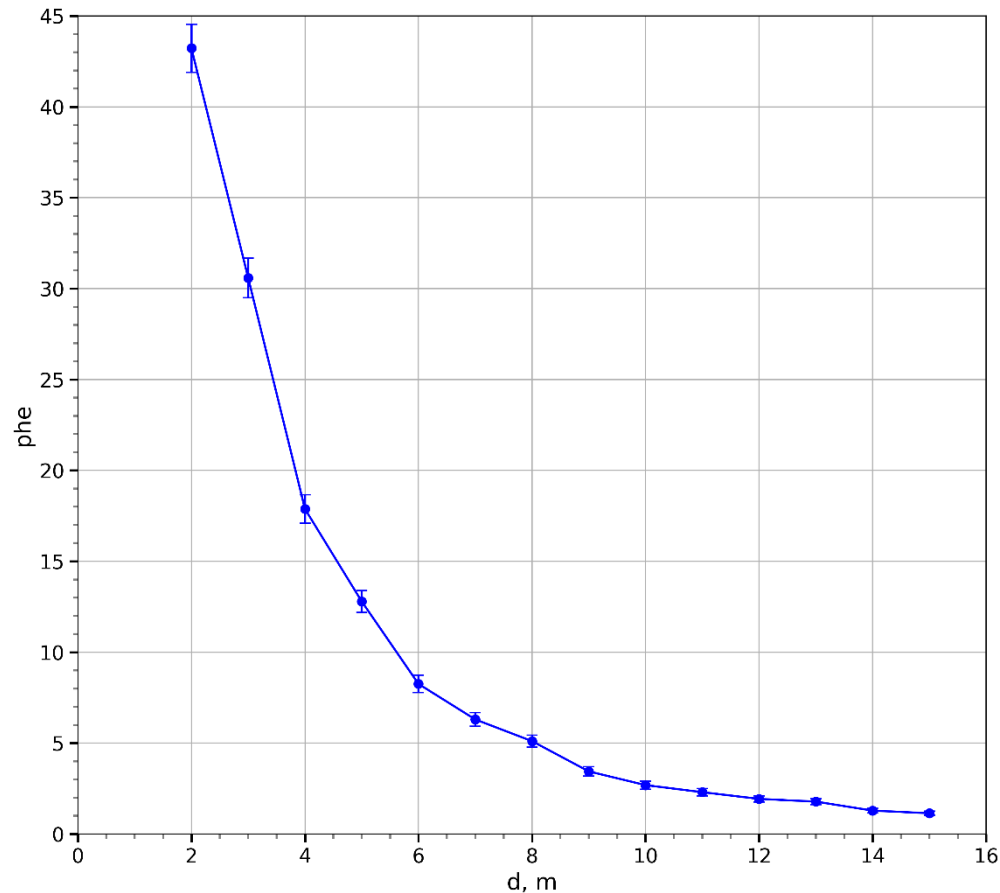


Рис. 3 Зависимость отклика ОМ от расстояния до трека мюона





Эффективная площадь ОМ

При зенитных углах $\theta \neq 0$
появляется зависимость от
азимутального угла φ

Эффективная площадь $\sim 300 \text{ м}^2$

Радиус $\sim 10 \text{ м}$

Промежуточные результаты

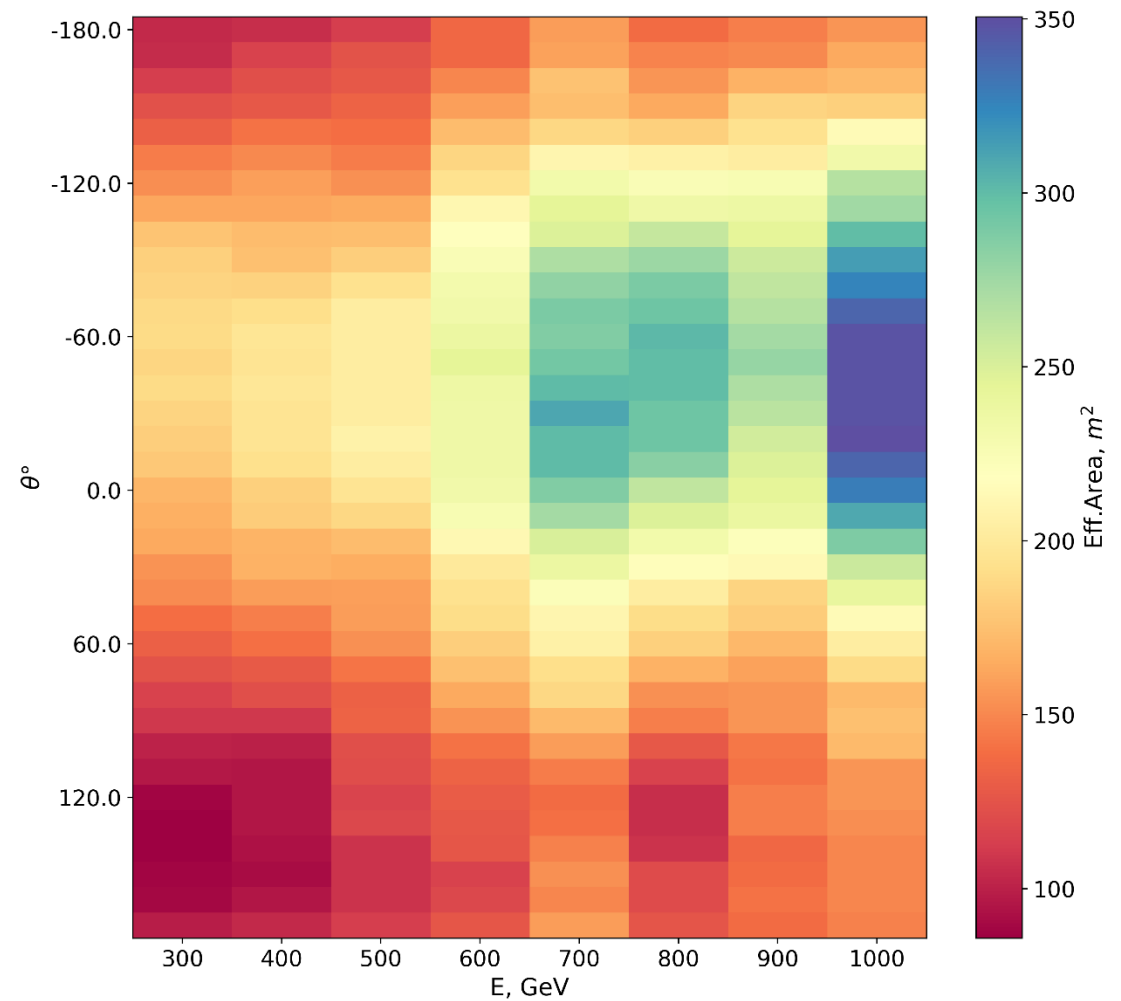


Рис. 4 Эффективная площадь ОМ

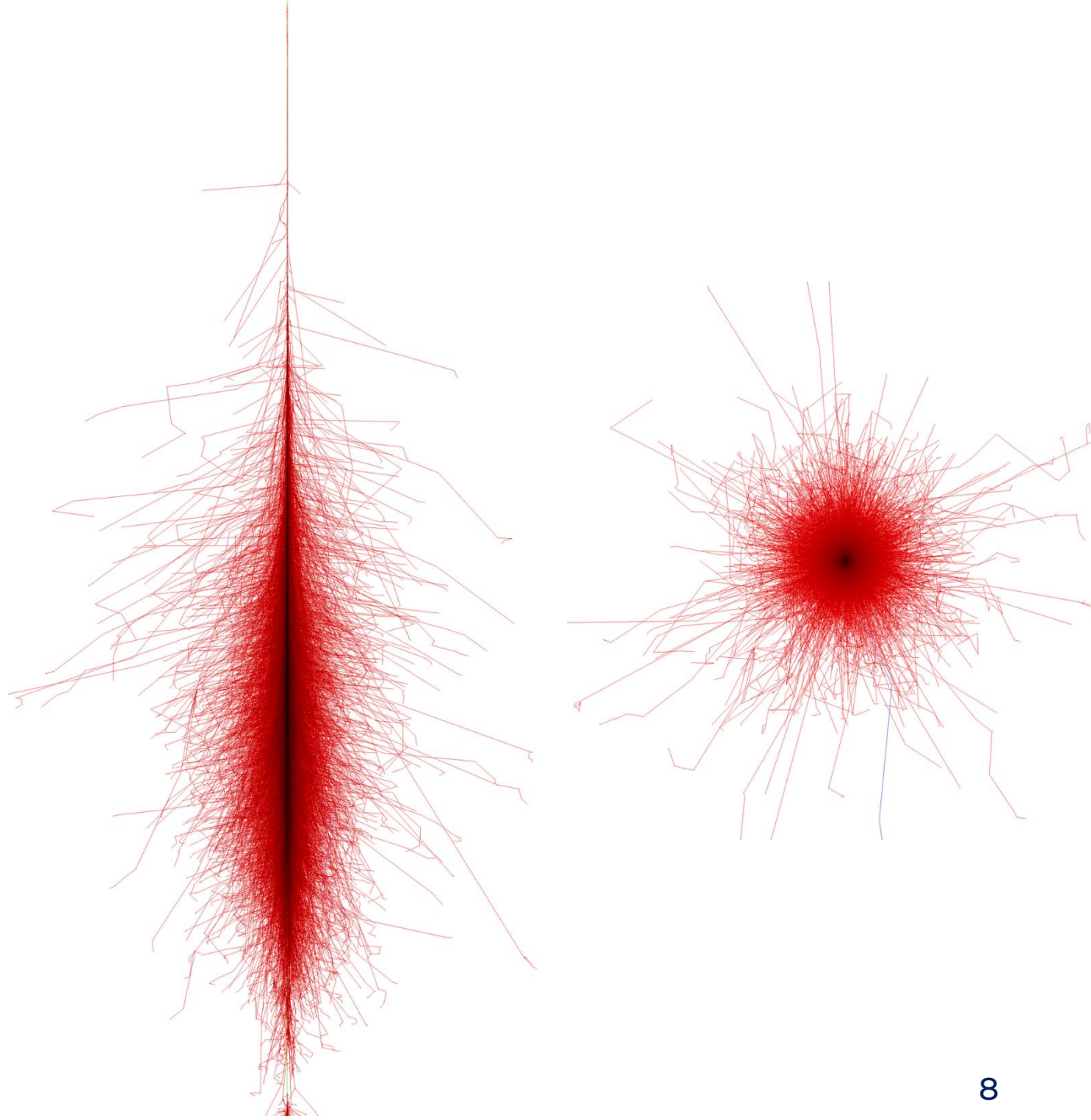


Атмосферные МЮНЫ

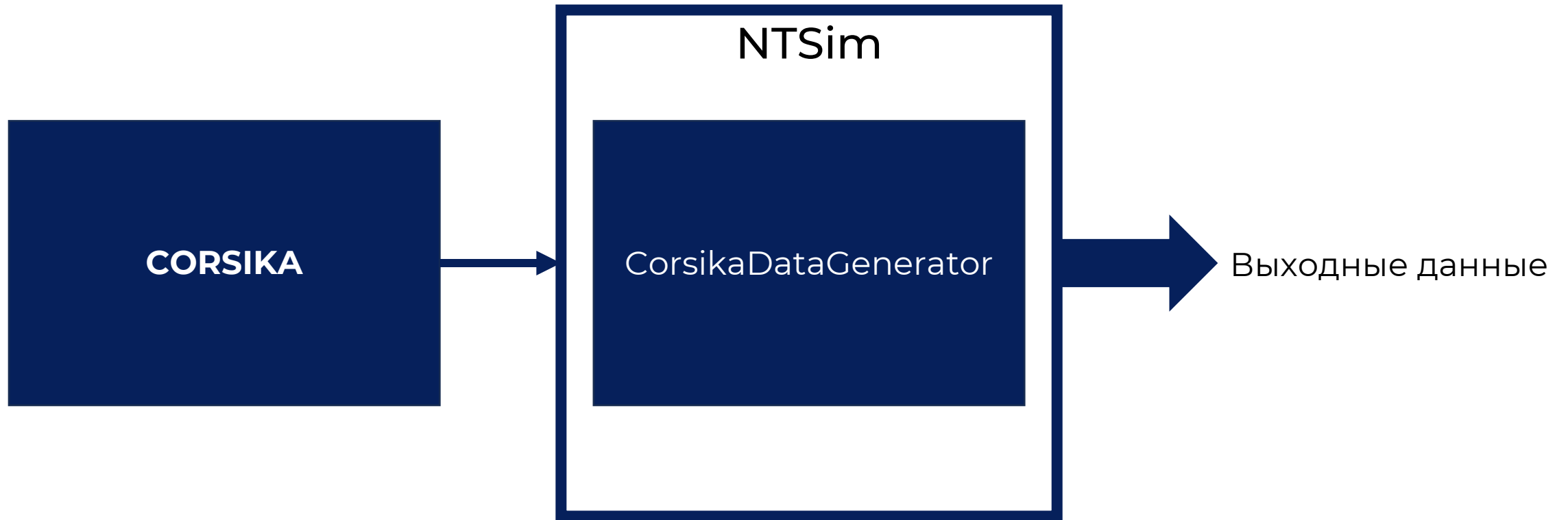
CORSIKA

COsmic **R**ay **SI**mulations for
KAscade

Мюонный ливень



Атмосферные мюоны



Атмосферные мюоны

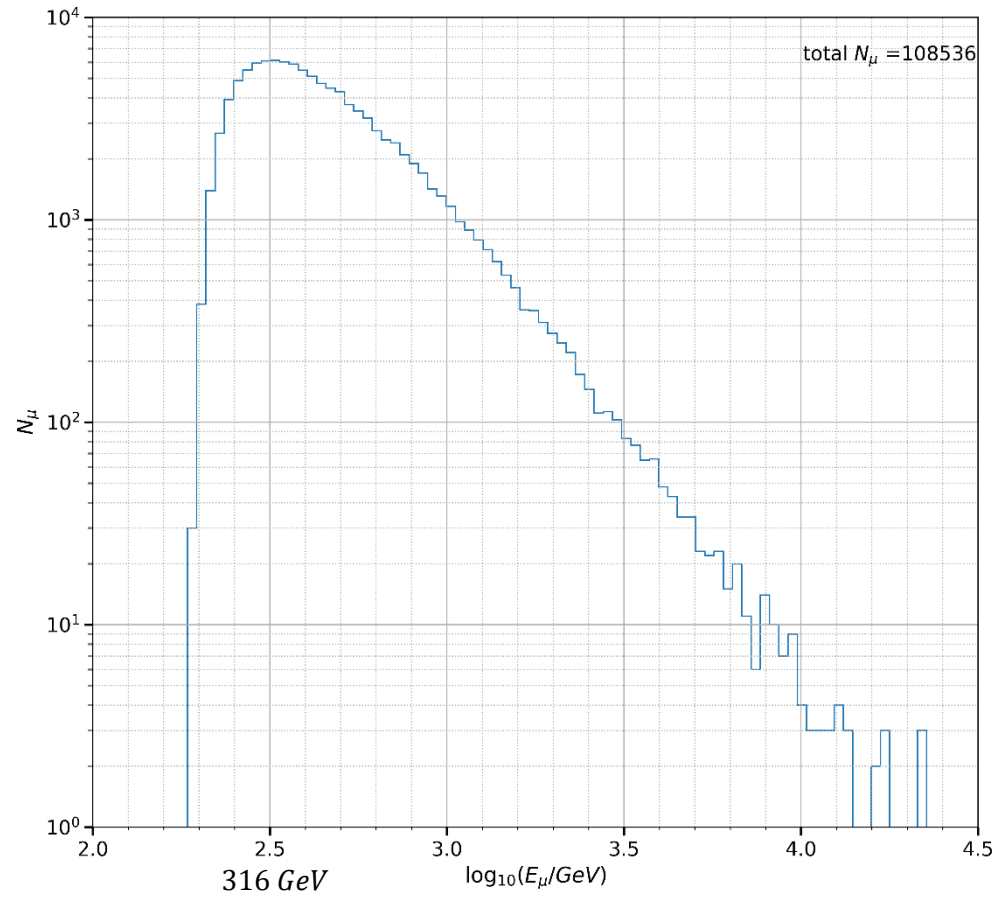


Рис. 5 Энергетический спектр мюонов

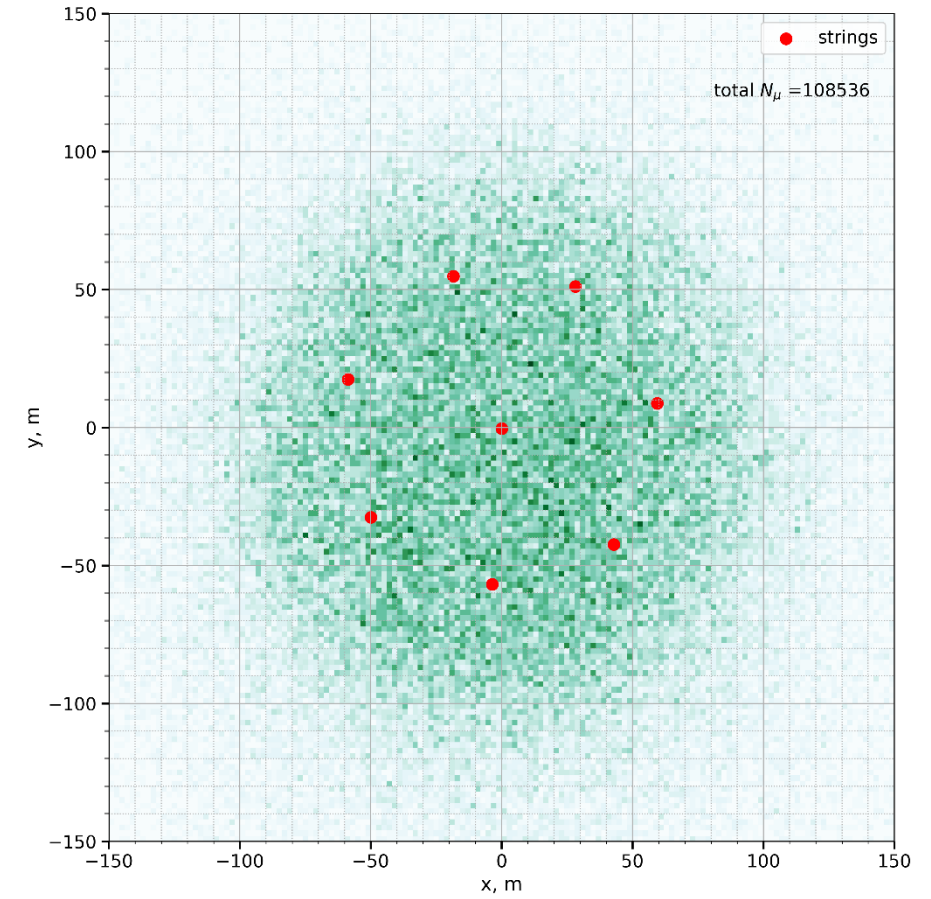


Рис. 6 Пространственное распределение мюонов*



Атмосферные мюоны

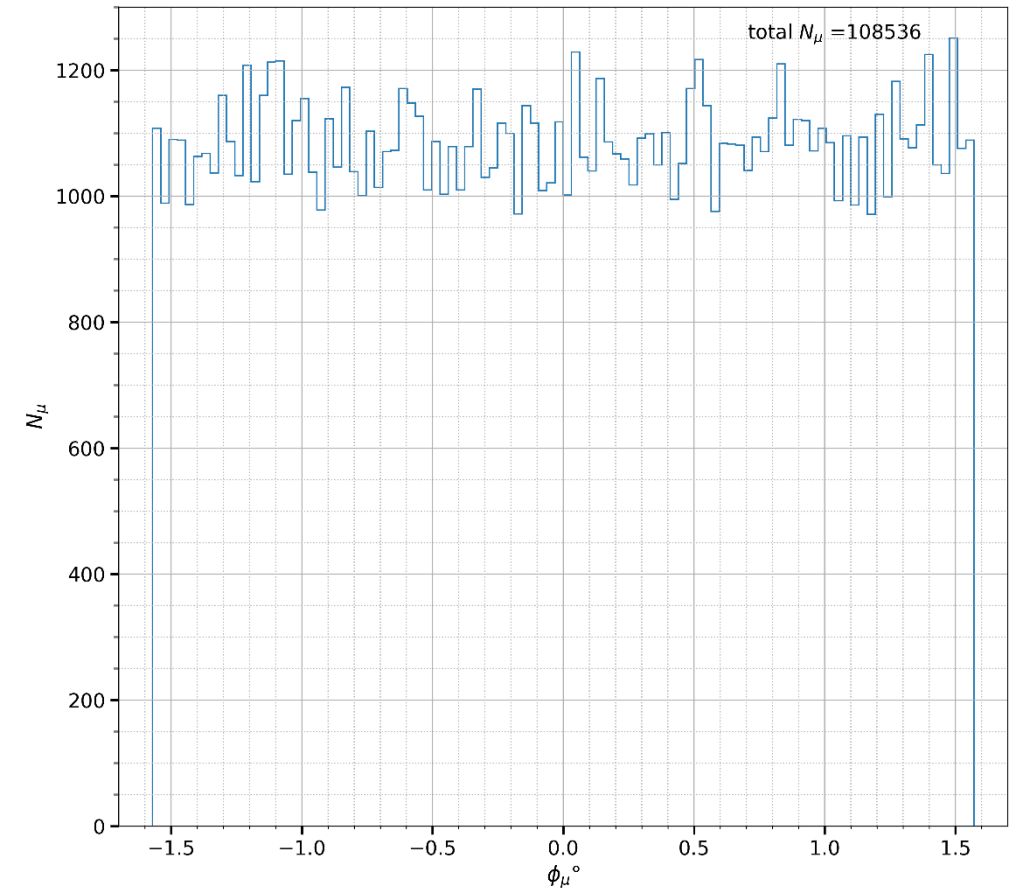
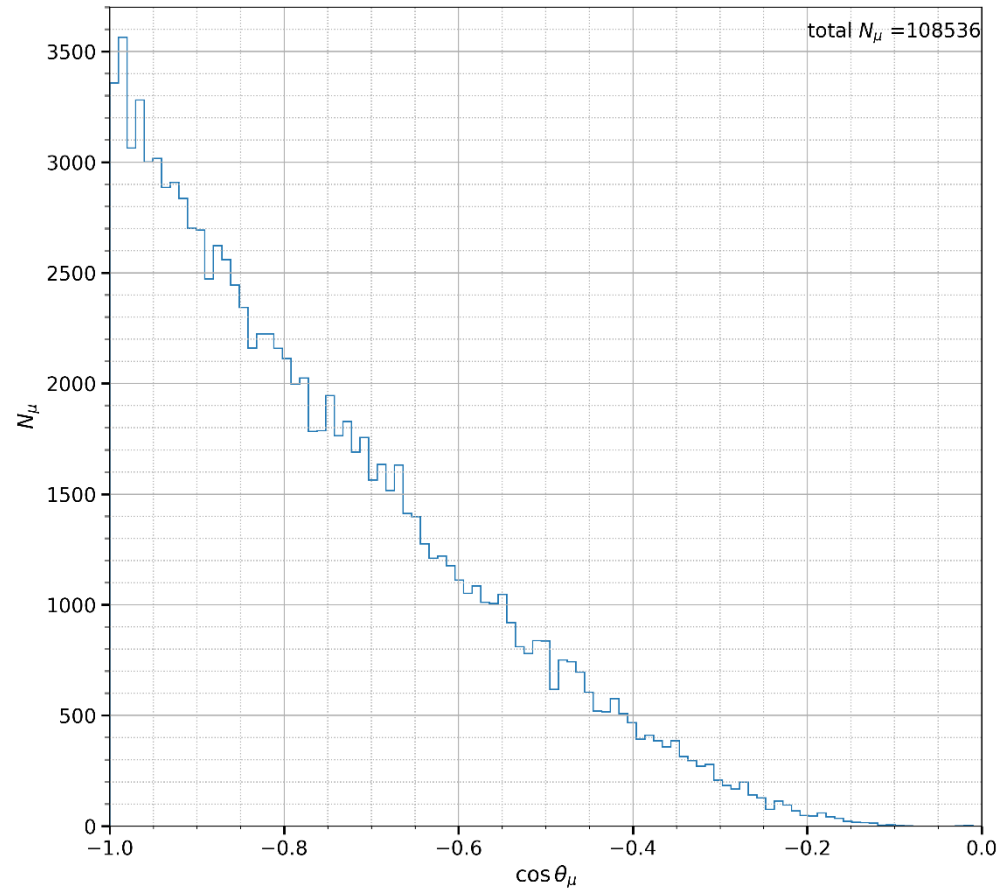


Рис. 7 Распределение мюонов по зенитному и азимутальному углам



BGVDTrigger

1. Transit Time Spread (TTS)
2. Poisson Sampling
3. Gumbel Distribution
4. One Cluster Trigger





Transit Time Spread

Цель: добавить временную зависимость от чувствительности анода фотоумножителя

Метод:

$$\mu = 62$$

$$\sigma = 3,4 / 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \ln(2)}$$

$$\Delta t \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma)$$

$$t_{hit} = t_{hit} + \Delta t$$

Anode sensitivity											(at +25 °C)
Dark current (After 30 min storage in darkness)		Dark count (After 15 hours storage in darkness)		Time response			Single photo-electron (Peak to valley ratio)		Pulse linearity		Type No.
Typ. (nA)	Max. (nA)	Typ. (s ⁻¹)	Max. (s ⁻¹)	Rise time Typ. (ns)	Electron transit time Typ. (ns)	Transit time spread (FWHM) Typ. (ns)	Min.	Typ.	at 2 % Deviation Typ. (mA)	at 5 % Deviation Typ. (mA)	
100	1000	4000	8000	3.6	54	2.4	1.5	2.8	40	60	R5912
5000	10 000	6000	12 000	4.4	72	3.0	1.5	2.8	30	60	R5912-20
500	1000	6000	10 000	3.6	54	2.4	1.5	2.8	40	60	R5912-100
100	1000	7000	15 000	3.8	62	3.4	1.5	2.8	40	60	R7081
5000	10 000	9000	19 000	5.0	80	3.9	1.5	2.8	30	60	R7081-20
500	1000	8000	16 000	3.8	62	3.4	1.5	2.8	40	60	R7081-100
500	1000	20 000	80 000	6.0	95	2.4	1.5	2.8	20 (100)	40 (150)	R12860

(): Measured with the special voltage distribution ratio (Tapered divider).

Hits			TriggerHits		
	uid	time_ns		uid	time_ns
0	11101	12.79455126	0	11101	65.25190149
1	11101	12.79455126	1	11101	65.47913498
2	11101	12.79455126	2	11101	65.60854218
3	11101	12.79455126	3	11101	66.00599531
4	11101	12.79455126	4	11101	66.16056625
5	11101	12.79455126	5	11101	66.25541457



Poisson Sampling

Цель: выбивание
фотоэлектрона из катода
фотоумножителя

Метод:

$$phe \sim \Pi(\mu = phe_{hit})$$

$$phe_{hit} = phe \in \mathbb{Z}$$

phe до	phe после
0.32299018	0
0.32299018	0
0.32299018	1
0.32299018	0
0.32299018	0
0.32299018	0
0.32299018	2



Gumbel Distribution

Цель: получить реалистичную форму импульса

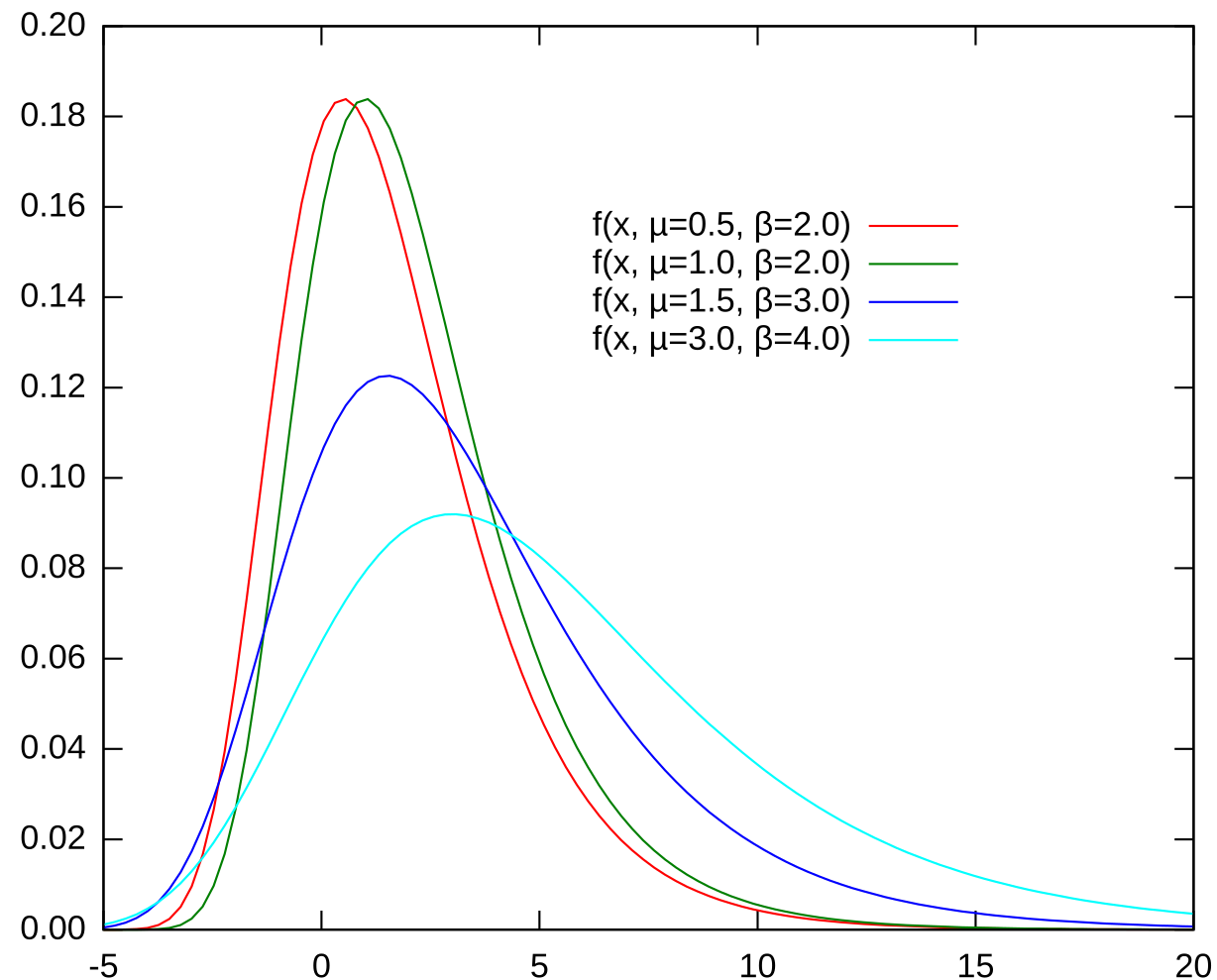
Метод:

$$p(x) = \frac{1}{\beta} \cdot e^{-(z + e^{-z})}$$

$$z = \frac{x - \mu}{\beta}$$

$$\int p(x) dx = 1$$

Значение в пике: $p(x = \mu) = \frac{1}{\beta e}$



Modified Gumbel Distribution

Обычное

$$p(x) = \frac{1}{\beta} \cdot e^{-(z + e^{-z})}$$

- $p(x = \mu) = \frac{1}{\beta e}$
- $\int p(x) dx = 1$

Нормированное

$$\begin{aligned} p(x) &= A \cdot e \cdot e^{-(z + e^{-z})} = \\ &= A \cdot e^{1-(z + e^{-z})} \end{aligned}$$

- $p(x = \mu) = A$
- $\int p(x) dx = \beta e A$





Modified Gumbel Distribution

$$p(x) = A \cdot e^{1-(z + e^{-z})}$$

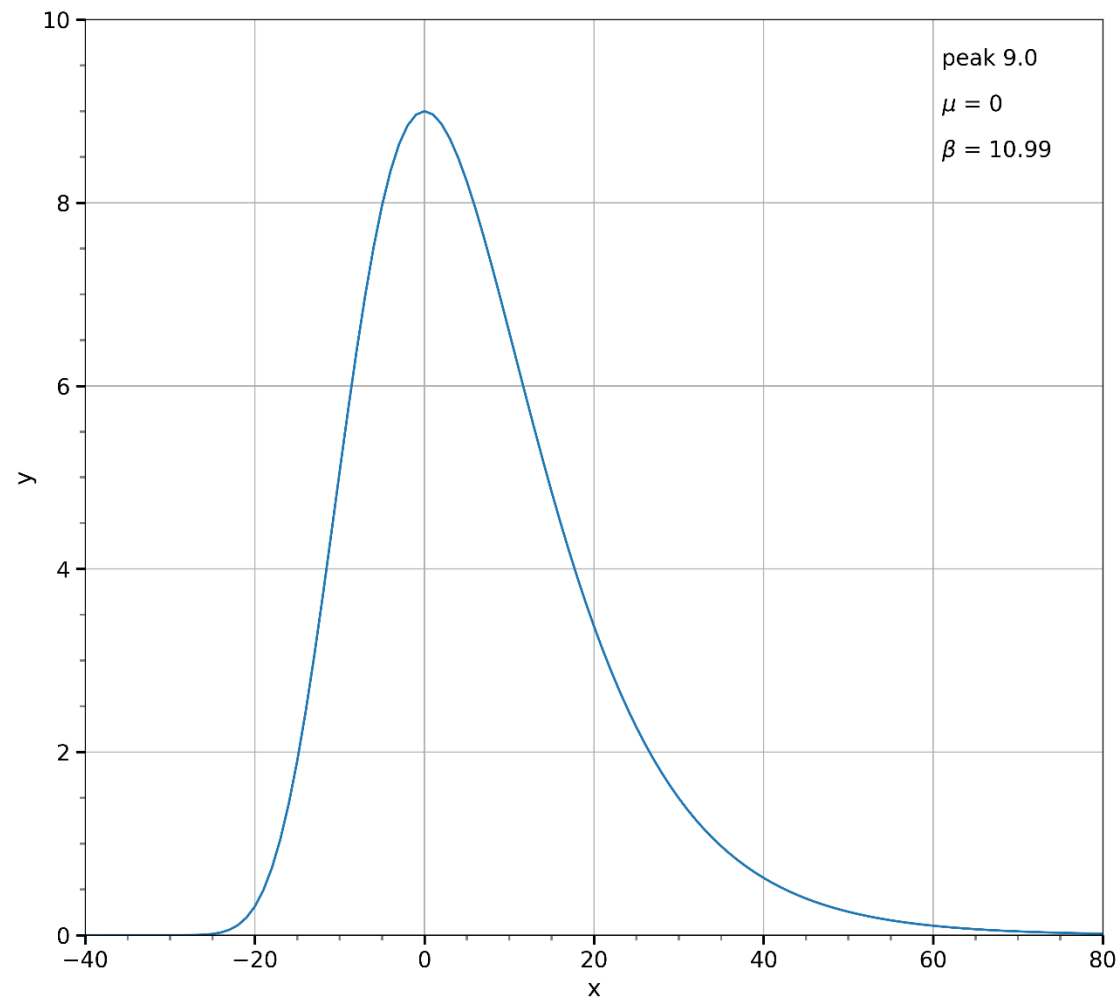
$$A \sim \mathcal{N}(\mu = phe_{hit}, \sigma = 0,35 \cdot \sqrt{phe_{hit}})$$

$$z = \frac{x - \mu}{\beta}$$

$$\beta = 2,198 \cdot 5$$

5 – шаг дискретизации (нс)

$$\mu = t_{hit}$$





Дискретизация

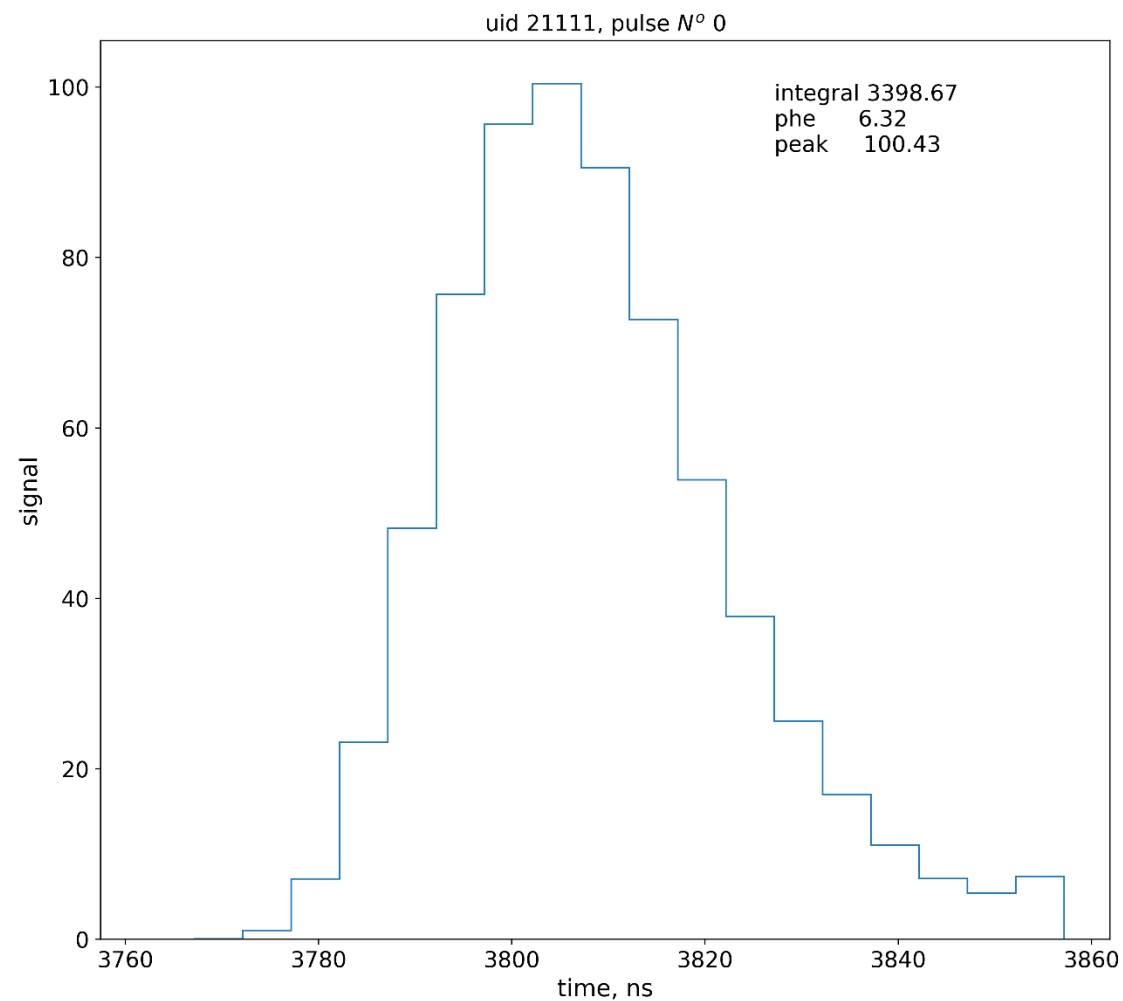
Временной интервал 100 нс

Дискретизация с шагом 5 нс

Скользящее среднее 1+3:

$$y_i = \frac{1}{4} \sum_{k=i}^{i+3} y_k$$

Перевод в коды АЦП





One Cluster Trigger

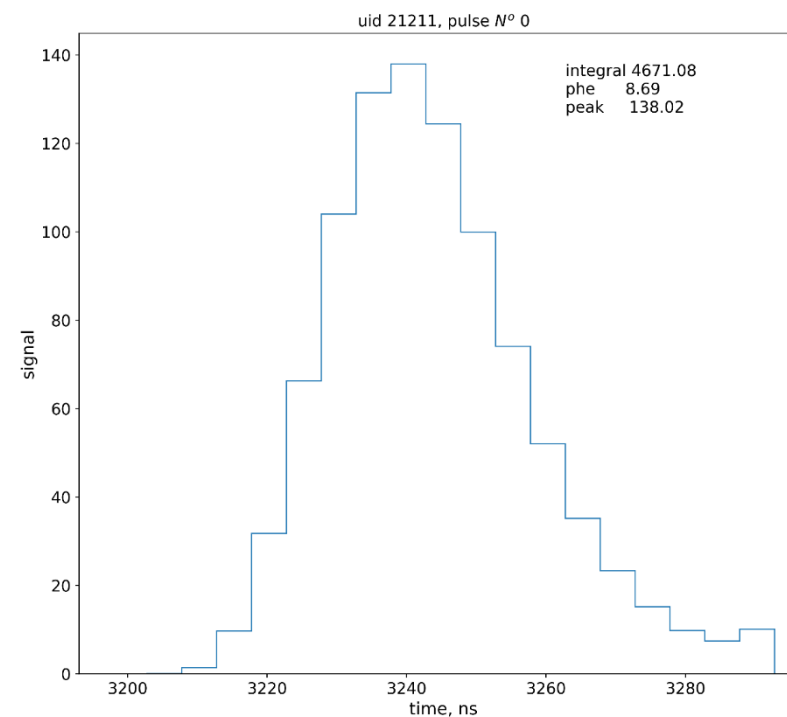
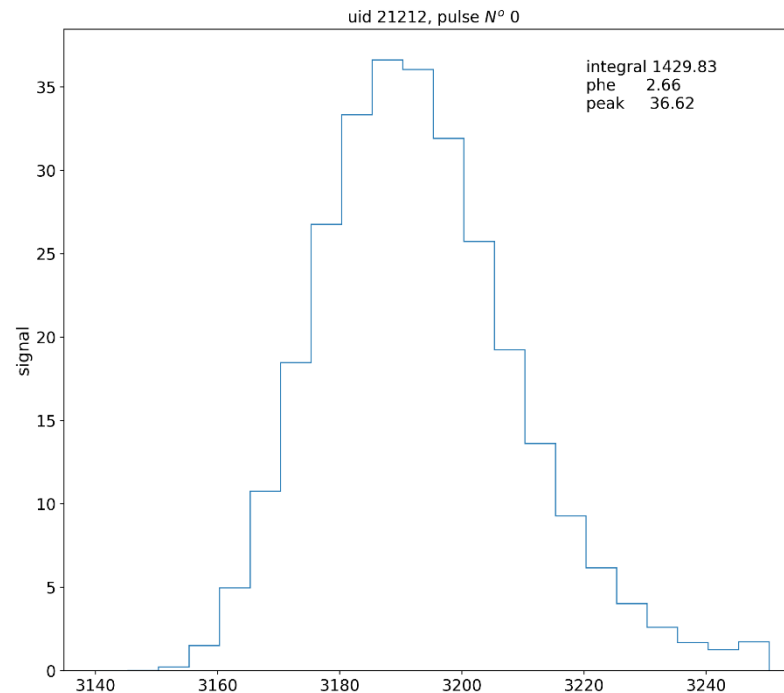
Цель: обработка сигналов в двух соседних ОМ, полученных в одном временном окне 100 нс

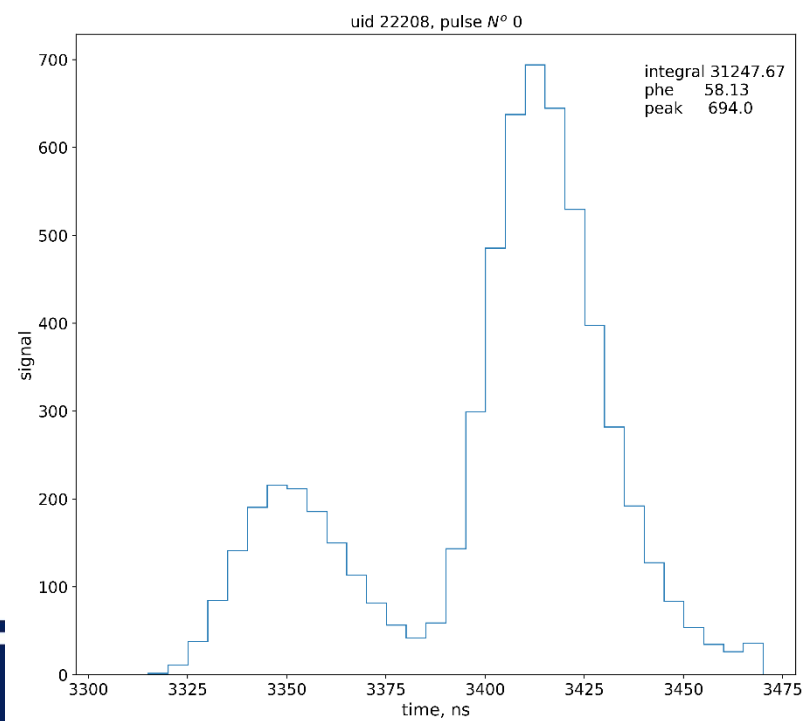
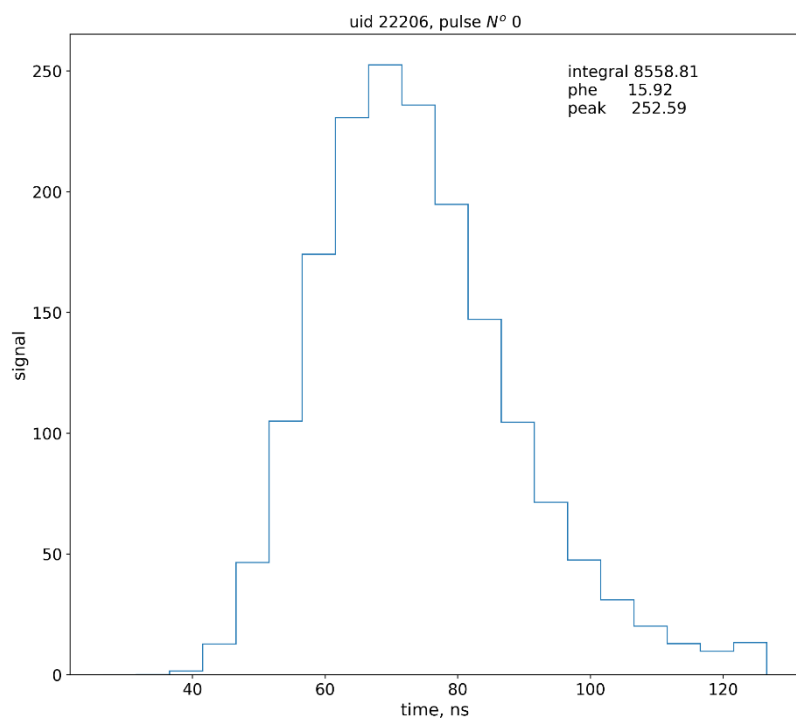
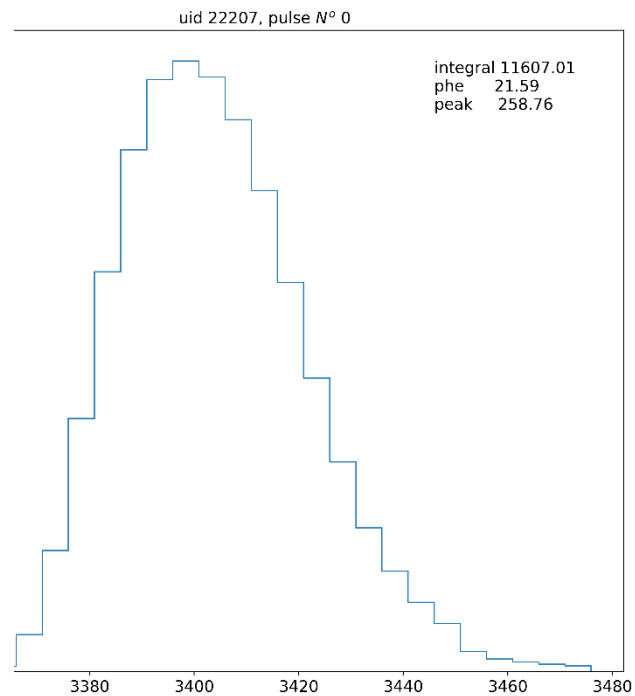
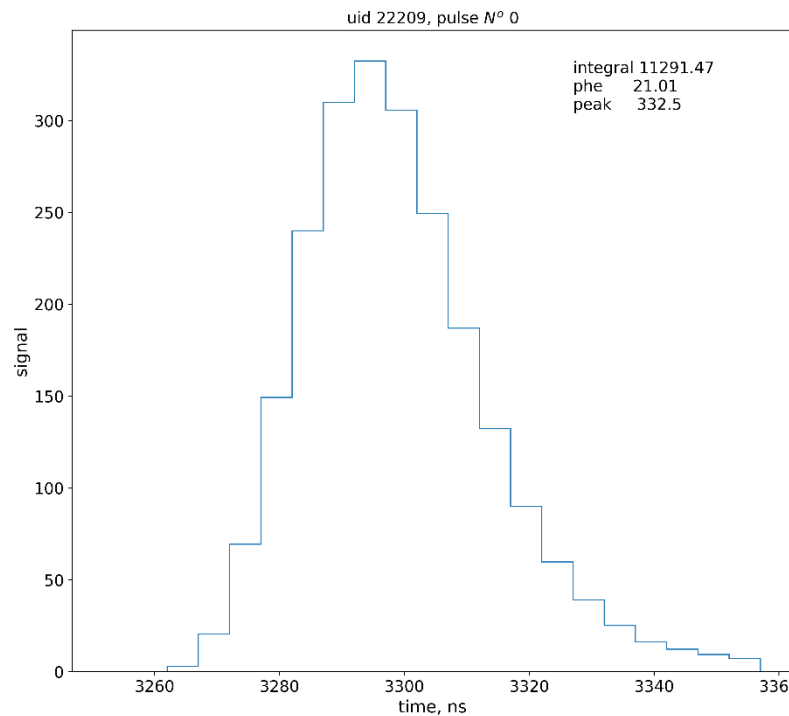
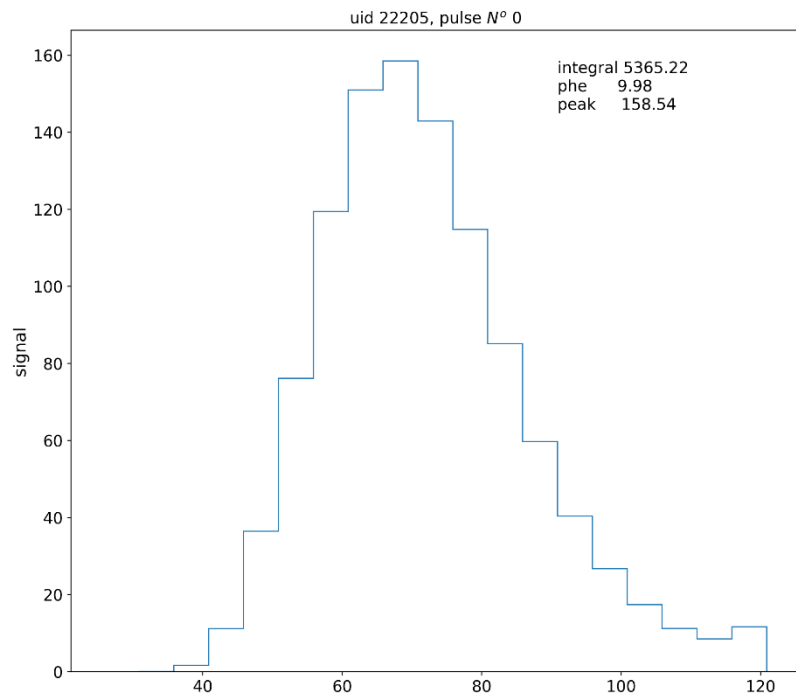
Метод:

$$phe_{max}^{uid} > b_{1,2} = 1,7 \text{ или } 3,5$$

$$phe_{max}^{uid\pm 1} > b_{2,1} = 3,5 \text{ или } 1,7$$

$$|t_{min/max}^{uid} - t_{max/min}^{uid\pm 1}| < 100 \text{ нс}$$





ИТОГИ

- Реализован класс CorsikaDataGenerator, считывающий файлы моделирования атмосферных ливней CORSIKA и запускающий моделирование NTSim
- Реализован класс BGVDTrigger для NTSim, который моделирует реалистичное поведение сигнала оптического модуля
 - Важно для валидации NTSim
- Оценена эффективная площадь оптического модуля
 - Полезно для разработки нейтринных детекторов следующего поколения
 - Важно для валидации NTSim
 - Важно для калибровки детекторов



Дополнительно

- Был адаптирован класс SmartRayTracer, вычисляющий отклик детектора, под обновлённый интерфейс NTSim
- Был адаптирован класс ClonerGenerator, созданный ранее для ускорения моделирования методом «клонирования» фотонов, под обновлённый интерфейс NTSim

