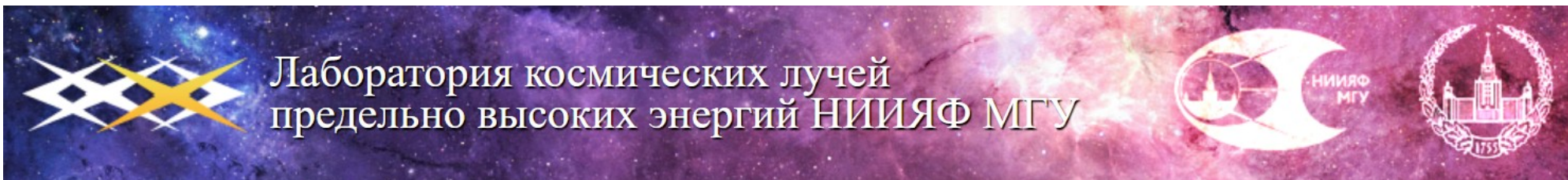


DLCP-2025

SBI* в задачах анализа динамических изображений многоканального детектора

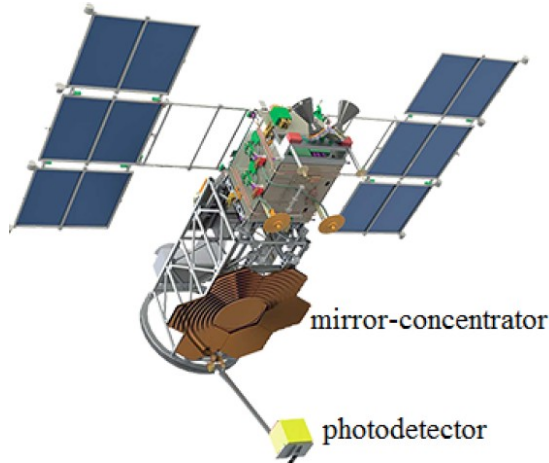
Р.Е. Сараев, С.А.Шаракин
2 июля 2025

*SBI = Simulation Based Inference



Многоканальные детекторы

- Орбитальные
- Mini-EUSO: поле зрения 260×260 км, угловое разрешение $\Delta\gamma = 0.9^\circ$ (6×6 км), временное разрешение 2.5 мкс, 2304 канал
- TUS: поле зрения 80×80 км, угловое разрешение $\Delta\gamma = 0.6^\circ$ (5×5 км), временное разрешение 0.8 мкс, 256 каналов регистрации.
- Наземные: PAIPS

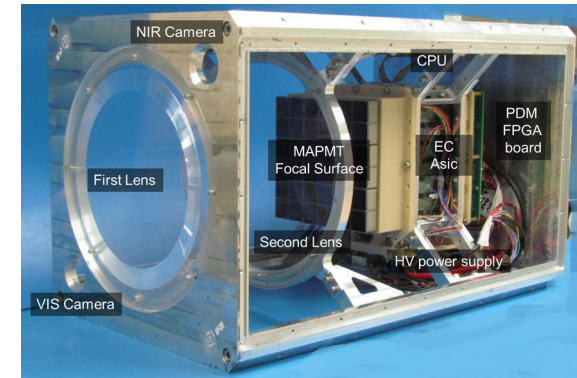


TUS
(на борту спутника «Ломоносов»)

1 EC = 4 PMTs



Mini-EUSO
(на борту МКС)

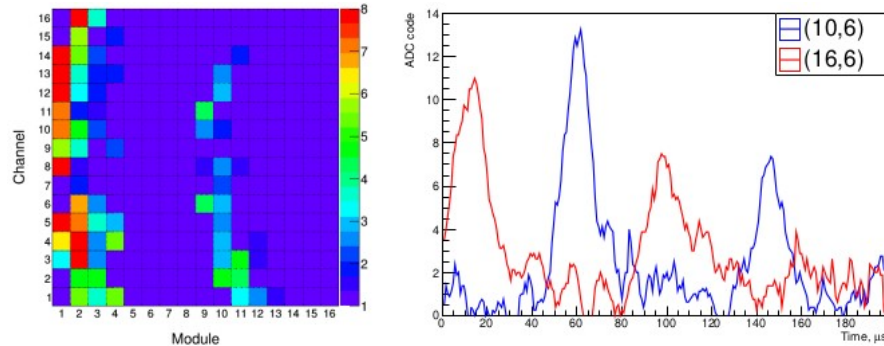
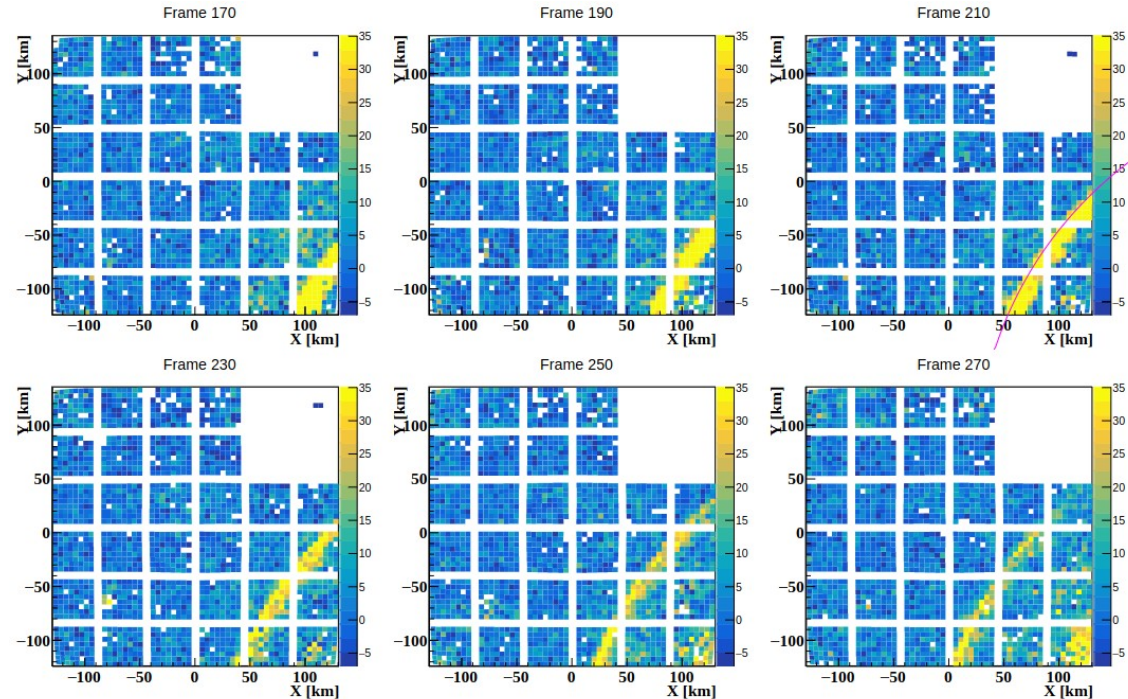


Динамические изображения «ЭЛЬФЫ»

ELVES: **E**mission of **L**ight and **V**ery **L**ow-frequency perturbations due to **E**lectromagnetic pulse **S**ources

Эльф Mini-EUSO

Двойной эльф TUS



Реконструкция ЭЛЬФА

МЕТОД: Байесовское моделирование — восстановление параметров эльфа и породившего его разряда с помощью байесовского вывода (Bayesian Inference)

$$P(\Theta|D) = \frac{\int P(D|\Theta, X) P(\Theta, X) dX}{P(D)}$$

- D – данные измерений.
- Θ, X – параметры модели (Θ – интересующие, X – вспомогательные, nuisance)
- $P(\Theta|D)$ – апостериорное распределение
- $P(D|\Theta, X)$ – функция правдоподобия
- $P(\Theta)$ – априорное распределение
- $P(D)$ – маргинальное правдоподобие (зачастую intractable)

Реализация: MCMC-сэмплирование и Вероятностное программирование

- PyMC – «движок» <https://www.pymc.io>
- Arviz – анализ результатов <https://python.arviz.org>



Кинематическая модель ELVES

$\Theta_{\text{kin}} = \{ x_0, y_0, z_0, H_e \}$ - локализация эльфа

$X = \{ T_0, \sigma_T, v, \sigma_r, \dots \}$ - ошибки измерения

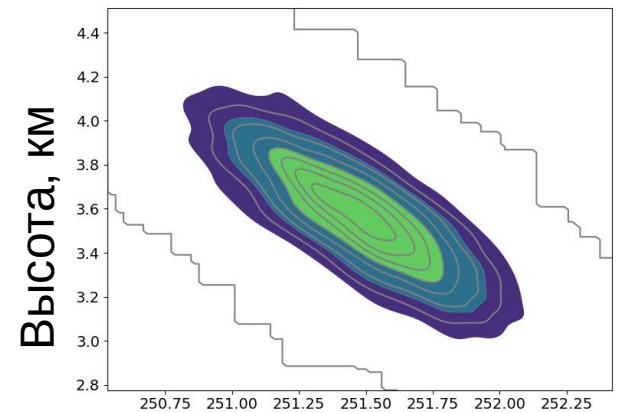
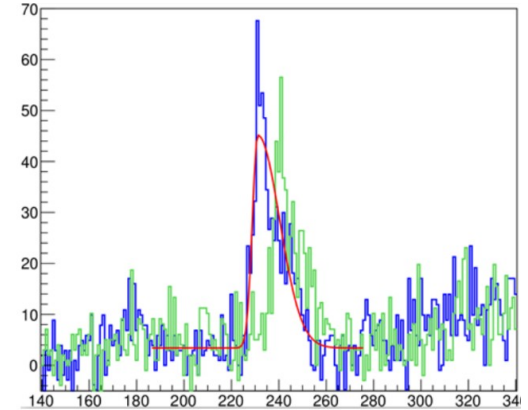
$D = \{ T_{\text{peak}}[i] \}$ - время пика сигнала (гипотеза: фронт свечения проходит через центр пикселя в этот момент)

$$cT_i = cT_0 + \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + (H_d - H_e)^2} + \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (H_e - z_0)^2} + \xi_i$$

Проблема (на модельных примерах):

сильная корреляция между z_0 и радиальным расстоянием приводит к смещённым оценкам и большим неточностям реконструкции.

Решение: извлечь дополнительную (полезную!) информацию из **динамики** свечения.



Радиальное расстояние, км

*Методы вероятностного программирования при реконструкции событий
многоканального изображающего детектора: ЭЛЬФЫ и ТРЕКИ / С.Шаракин, Р. Сараев*

Динамическая модель ELVES

- Преимущество ДМ: можно восстанавливать не только положение разряда, но и его ориентацию и даже функцию тока.
- Проблема ДМ: «*intractable*» функция правдоподобия
- Идея: заменить функцию правдоподобия на вызовы симулятора, т. е. стохастического генератора данных по набору параметров
- Метод реконструкции: SBI — Simulation Based Inference
 - ABC (Approximate bayesian computation) — приблизительный байесовский вывод на основе Sequential MC

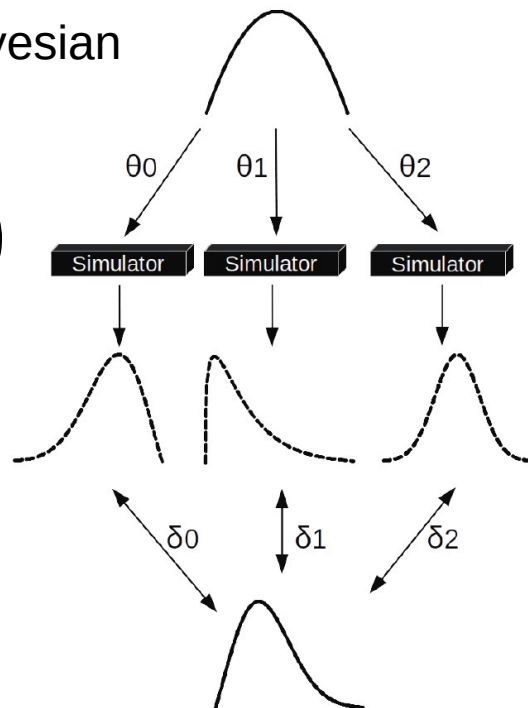
SBI-ABC

Алгоритм SBI: ABC (Approximate Bayesian Computation)

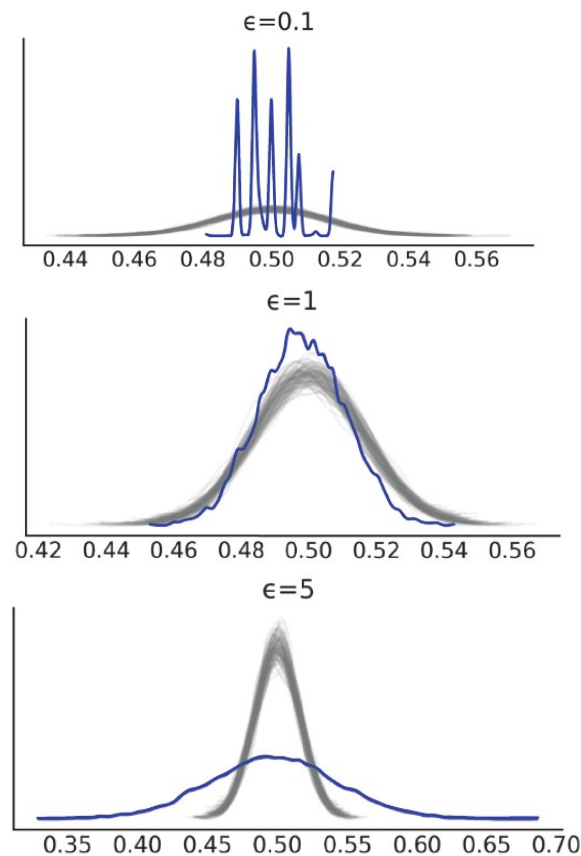
$$P(D|\theta) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \delta(S(D), S(\hat{D})|\epsilon)$$

$$\hat{D} \sim \text{sim}(\theta)$$

S — статистика
δ — расстояние (в пространстве данных или статистик)
ε — параметр допуска (tolerance parameter)



Один шаг ABC



Выбор ε

Эльфолокация

Эльфолокация — метод изучения грозовых разрядов по информации, извлеченной из их «ионосферных отпечатков» (эльфов).

В рамках ДМ:

$\theta = \theta_{\text{kin}} + \{ \alpha, \varphi, A_0, \dots \}$ — локализация + динамические пара

$D = \{ S_k[i] \}$ — временная развёртка сигнала в пикселе i

Параметры ABC:

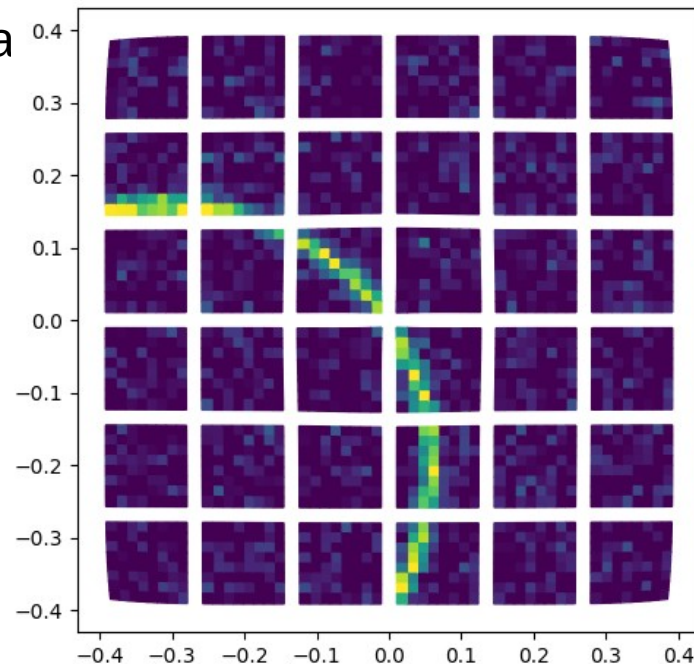
$$\delta = \sum_i -\frac{(D_{oi} - D_{si})^2}{2\epsilon^2} \quad \text{— гауссово расстояние}$$

S (статистика): не применяется

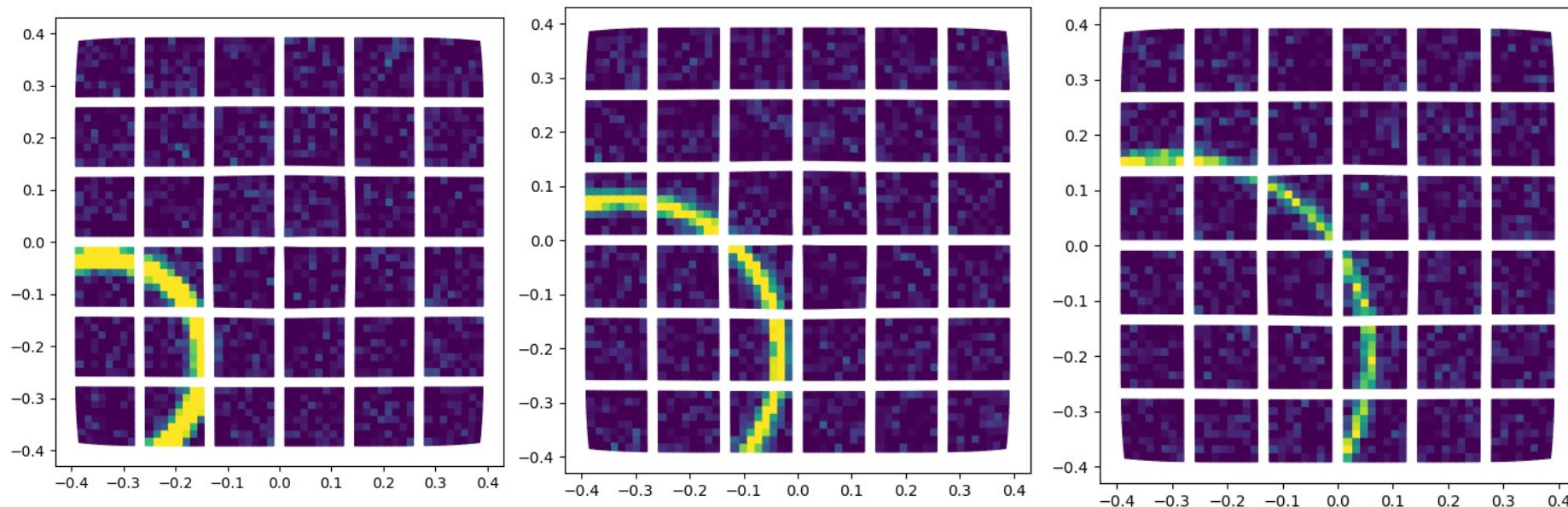
Симулятор эльфов: Монте-Карло

SBI движок: PyMC

Демонстрация:
Сгенерированный ELVES



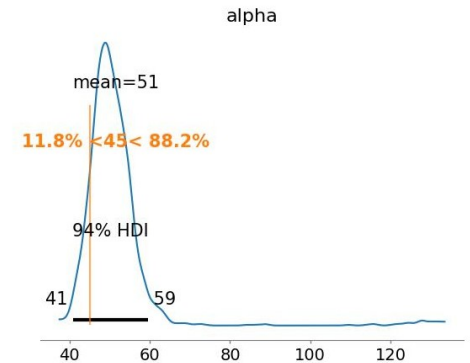
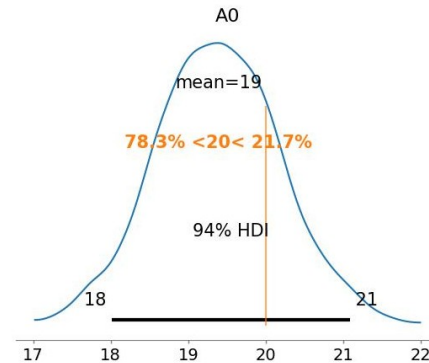
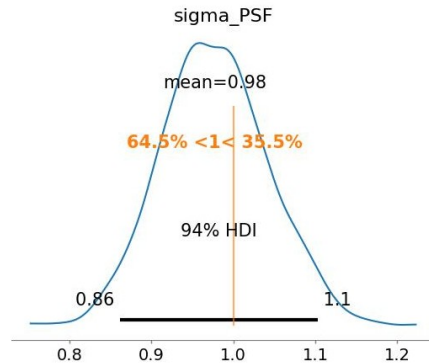
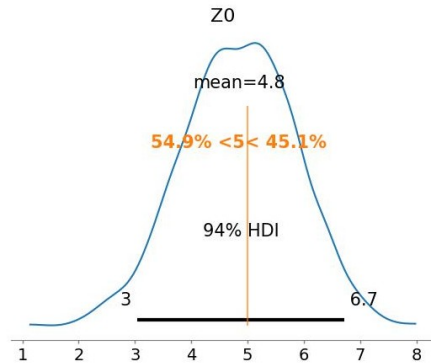
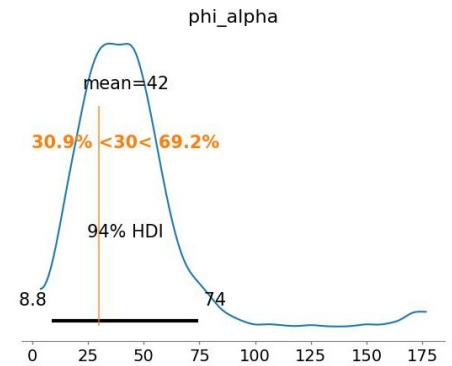
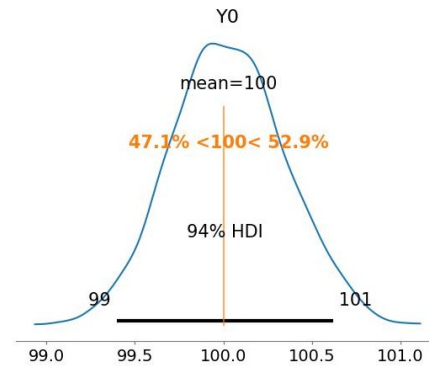
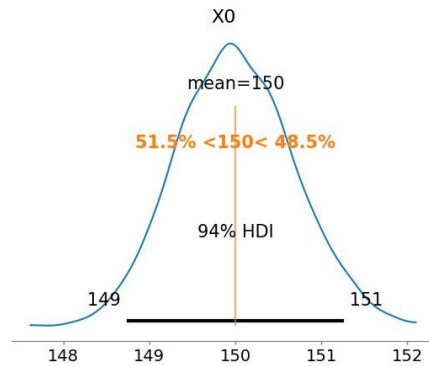
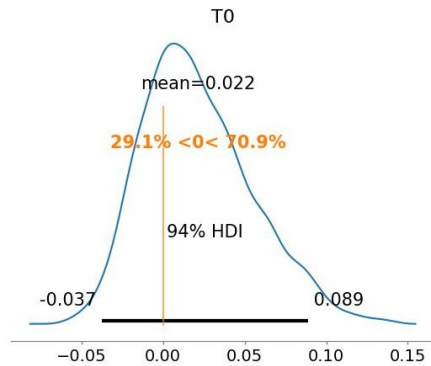
Имитационное событие ELVES



Реконструкция параметров молниевых разряда

	X0, km	Y0, km	Z0, km	$\sigma_{\text{PSF}}, ^\circ$	A0	$\varphi, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$
Truth	150.0	100.0	5.0	1.0	20	30	45
Reco	150.0 $\pm$ 0.7	100.0 $\pm$ 0.3	5.0 $\pm$ 1.0	0.98 $\pm$ 0.07	19.4 $\pm$ 0.8	40 $\pm$ 20	51 $\pm$ 11

Реконструкция параметров молниевых разряда



Вычислительные проблемы

- ABC требует многократный вызов симулятора, что сильно замедляет реконструкцию.
 - Решение 1: «ускорить» сам симулятор (например, с помощью CUDA)
 - Решение 2: заменить симулятор суррогатной моделью (например, нейросетью или гауссовым процессом)

Выводы

- На примере реконструкции событий типа ELVES:
 - Показано, что усложнение байесовской модели может привести к невозможности явной записи функции правдоподобия.
 - Продемонстрирована модель, использующая подход SBI, опирающийся на использование стохастического симулятора событий.

Спасибо за внимание!