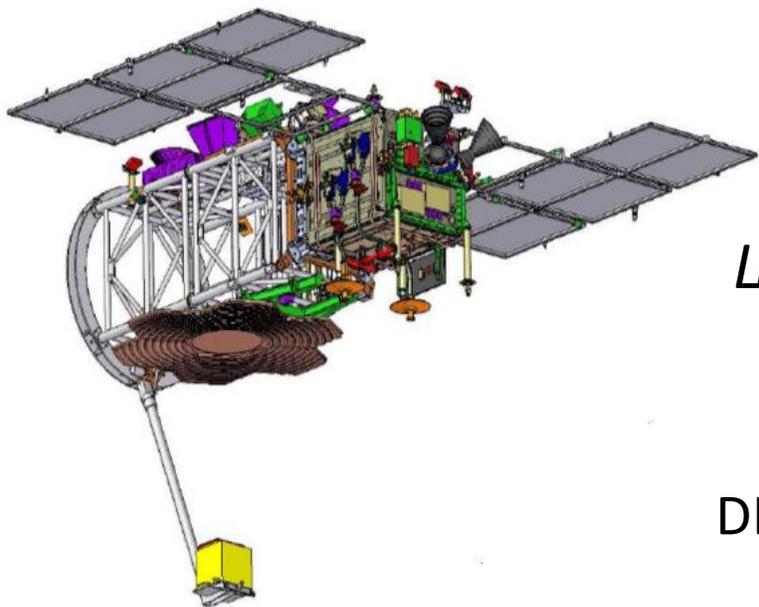




Лаборатория космических лучей
предельно высоких энергий НИИЯФ МГУ

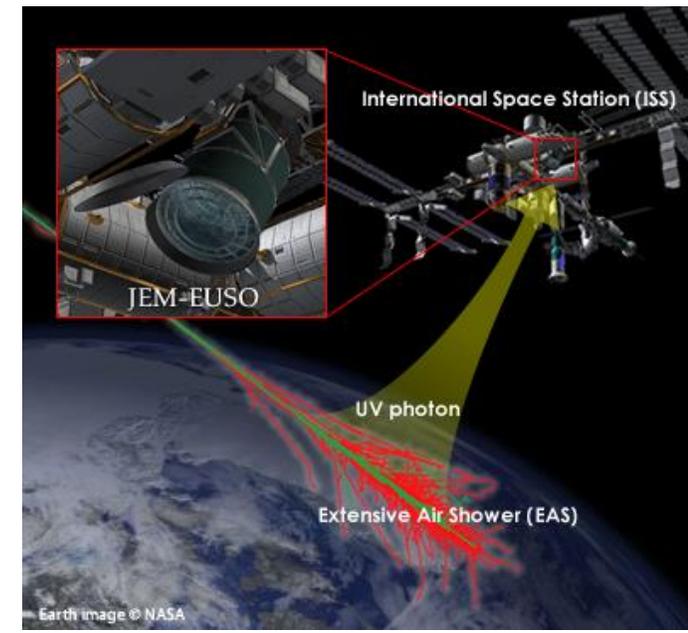


Методы вероятностного программирования при реконструкции событий многоканального изображающего детектора: ЭЛЬФЫ и ТРЕКИ



*Шаракин Сергей, Сараев Роман
(НИИЯФ МГУ)*

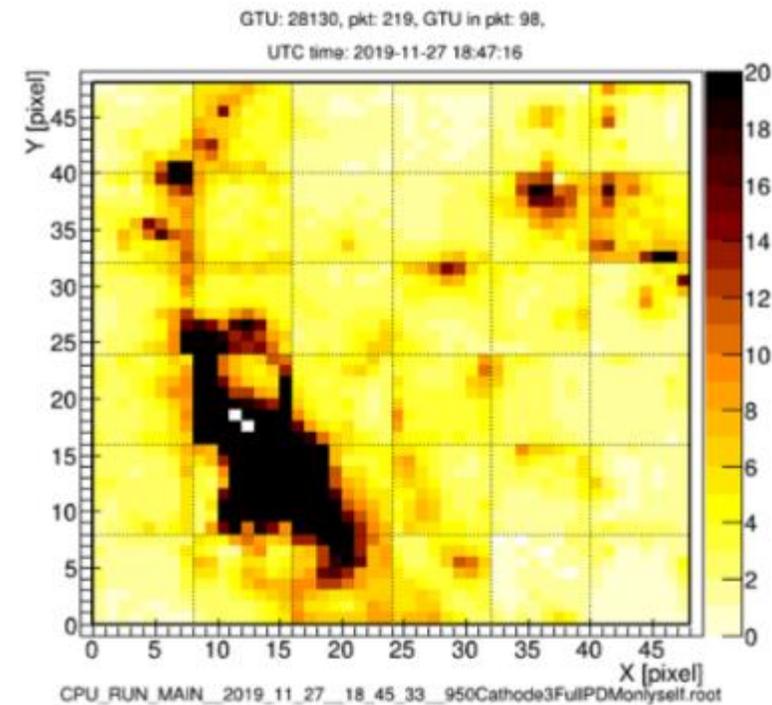
DLCP-2024: 19-21 июня 2024 г., Москва



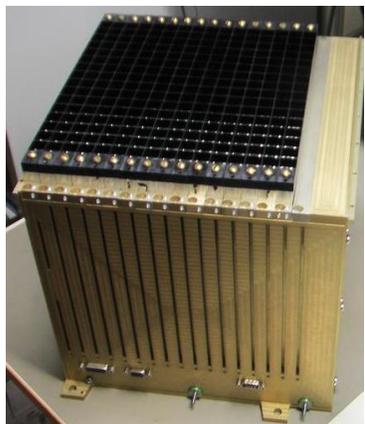
«Плохие» детекторы и транзиенты



Детектор «ТУС» (2016/17) и его фотоприемник (256 каналов)

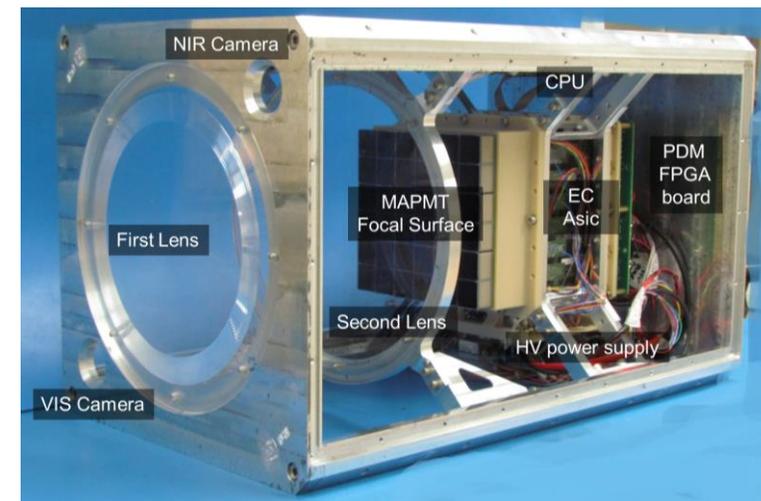


Детектор «УФ атмосфера» и его фотоприемник (2304 канала)

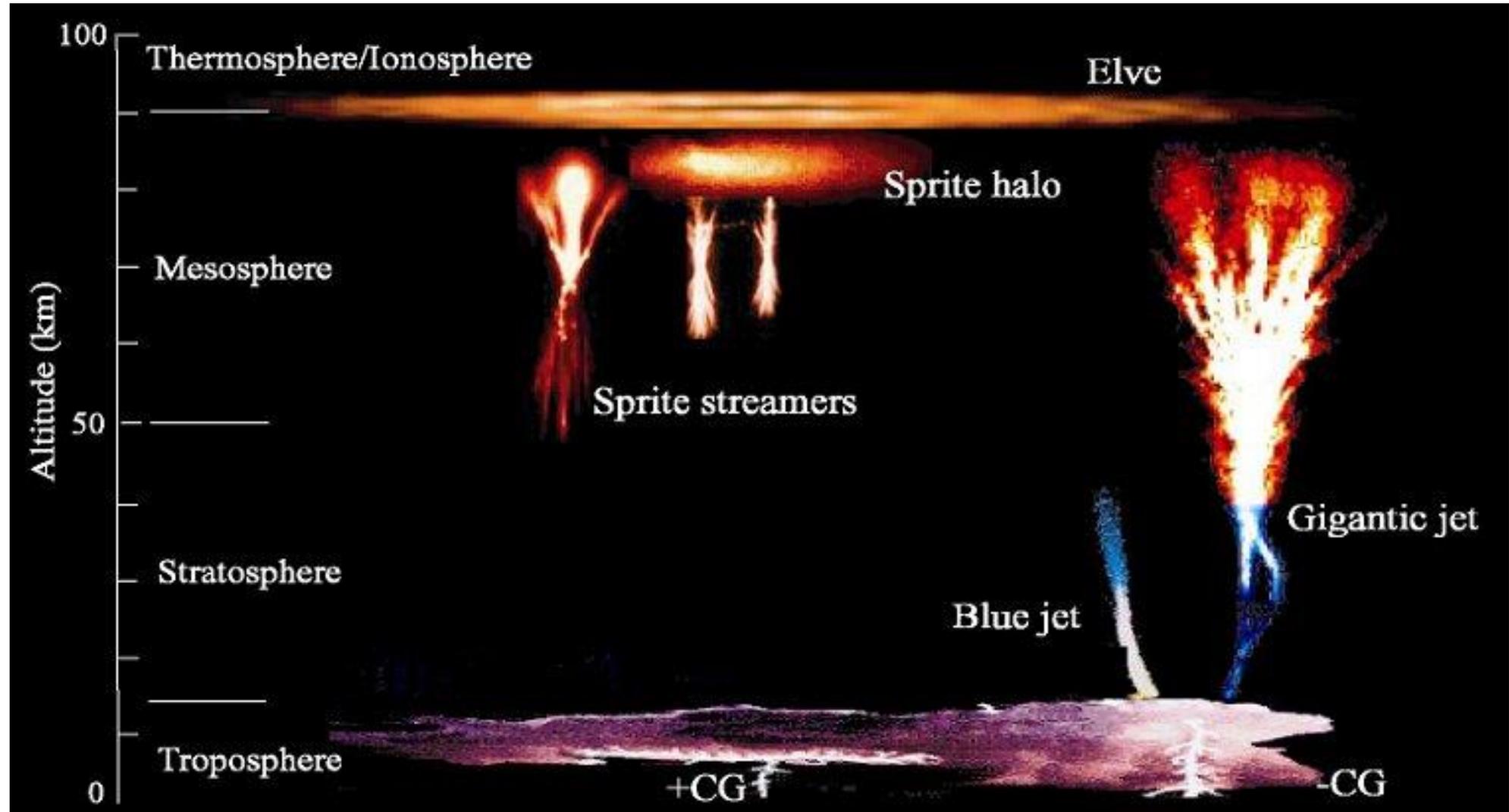


Многоканальные детекторы транзиентов (изображающие фотометры):

- **Фотоприемник:** матрица ФЭУ и МАФЭУ
- **Достоинства:** высокая чувствительность, высокое временное разрешение
- **Недостатки:** низкое угловое разрешение ($\sim 1^\circ$), неоднородность отклика, «мертвые» зоны,...



Зоопарк ТАЯ: спрайты, эльфы, джеты...



Эльф (ELVES) и его природа

- *ELVES* (Emission of Light and Very low frequency perturbations due to Electromagnetic pulse Sources)
- *Наблюдения*: с земли, с самолета, с орбиты (Space Shuttle, ISS, TUS, Mini-EUSO)

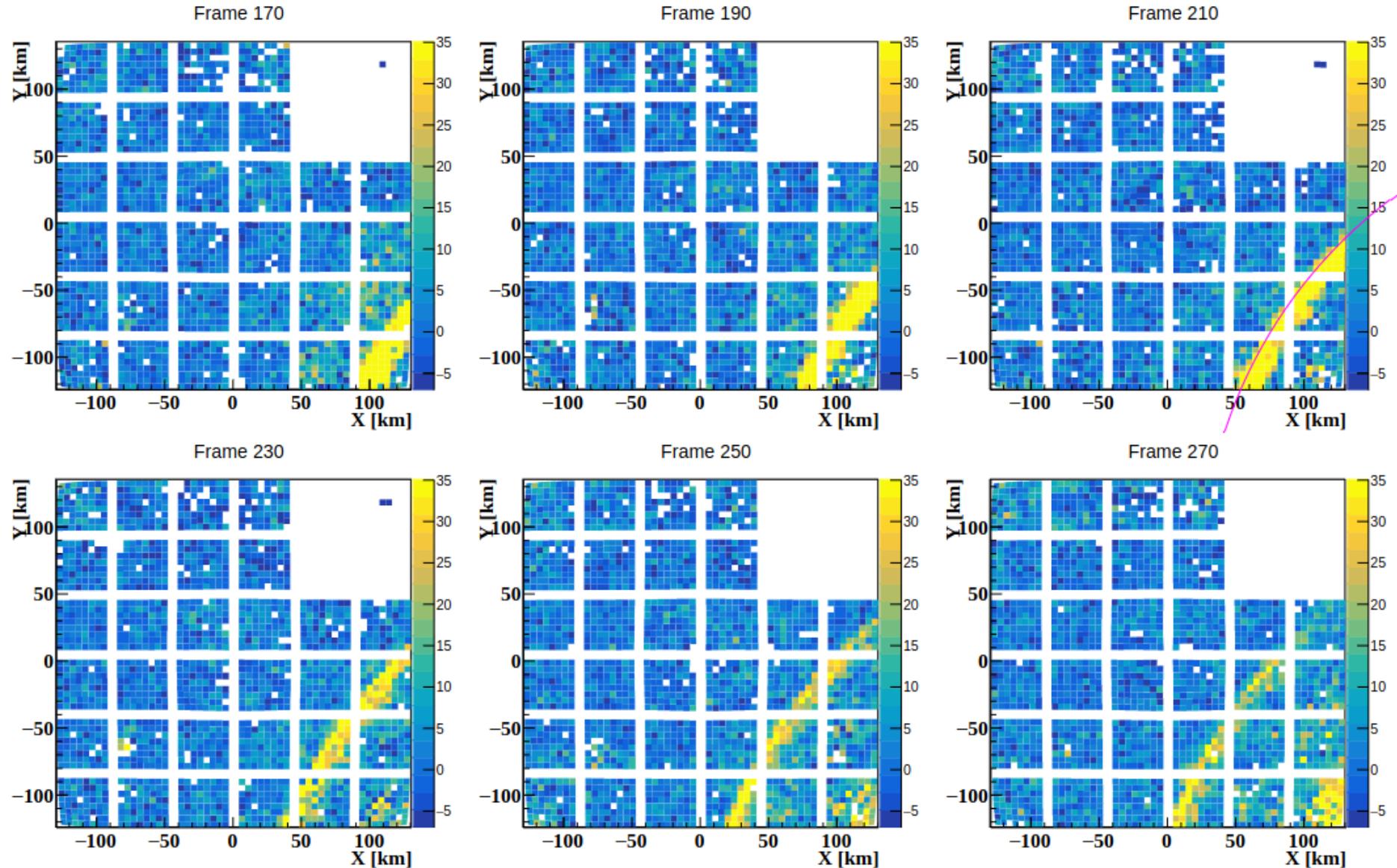


Gigantic Jets

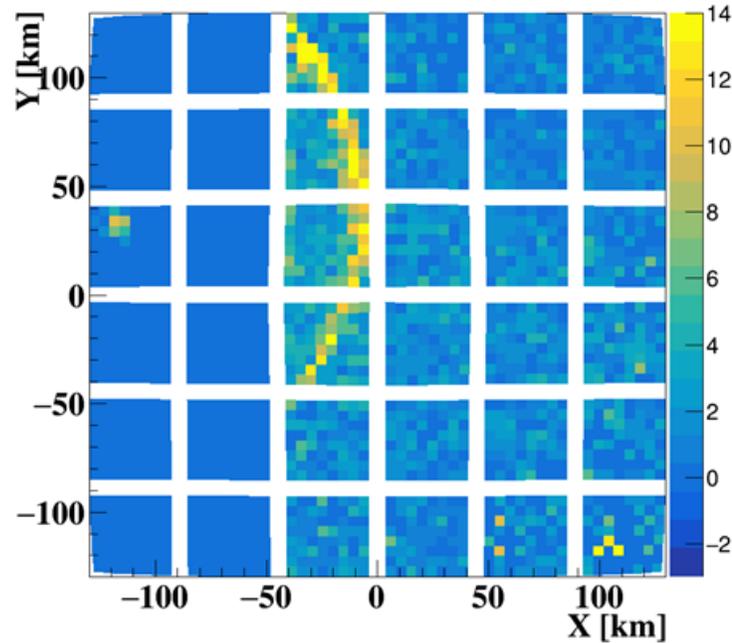


Sprites

Эльфы «УФ атмосферы»: ELVES20190512

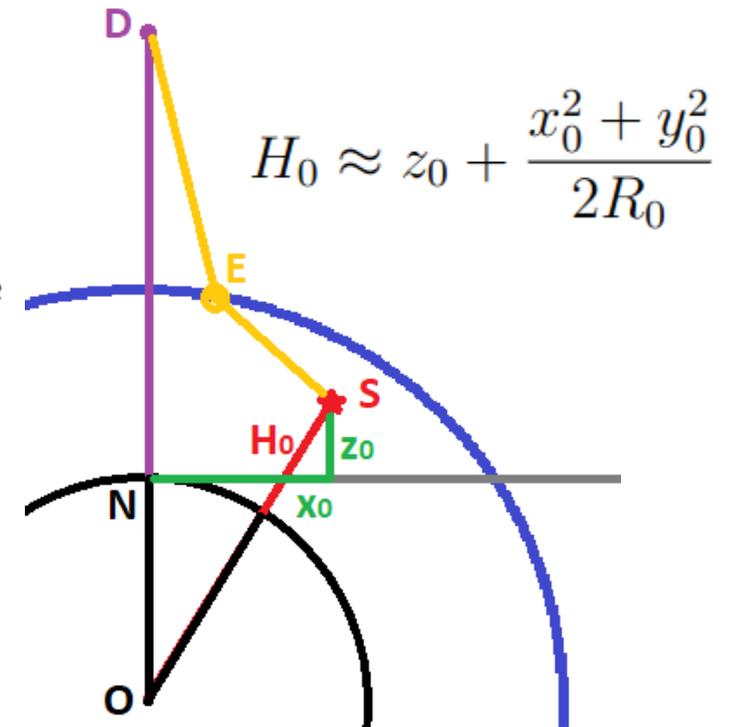


Эльф как «отпечаток» грозы



Иду на грозу 2.0:

заглянуть внутрь грозового облака
посредством ионосферного «отпечатка»



Вероятностные (байесовские) модели

- *Традиционный подход*: факторизация геометрических данных (аппроксимация мгновенного изображения кольцом).
- *Кинематическая модель*: пространственно-временной паттерн
- *Вероятностная модель*: а) параметризация самого явления (Θ) и процедуры его измерения (X), б) параметры – стохастические числа (*распределения*)

Posterior ~ Likelihood * Prior

$$\text{prob}(\Theta | \text{Data}) \sim \text{prob}(\text{Data} | \Theta) * \text{prob}(\Theta)$$

или после маргинализации

$$\text{prob}(\Theta | \text{Data}) \sim \int \text{prob}(\text{Data} | \Theta, X) * \text{prob}(\Theta, X) dX$$

Вероятностное программирование

- MCMC (Markov Chain Monte-Carlo)

=> сэмплирование из $\text{prob}(\Theta | D)$

- PyMC (“движок”): <https://www.pymc.io>

- ArViz (анализ результатов): <https://python.arviz.org>

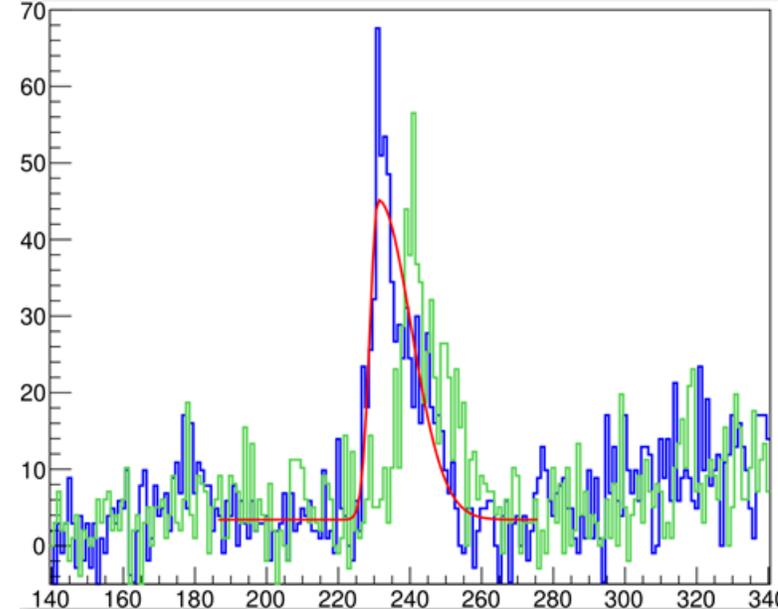


Реконструкция эльфы

$\Theta = \{ x_0, y_0, z_0, H_e \}$ локализация источника EMP и слоя свечения

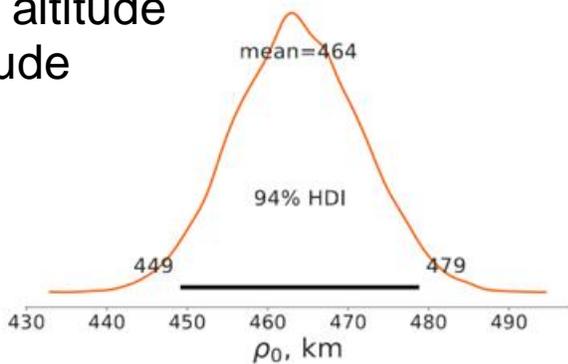
$X = \{ T_0, \sigma_T, v, \sigma_r, \dots \}$ ошибки измерения

Data = $\{ T_{\text{peak}}[i][j] \}$ время пика активного сигнала

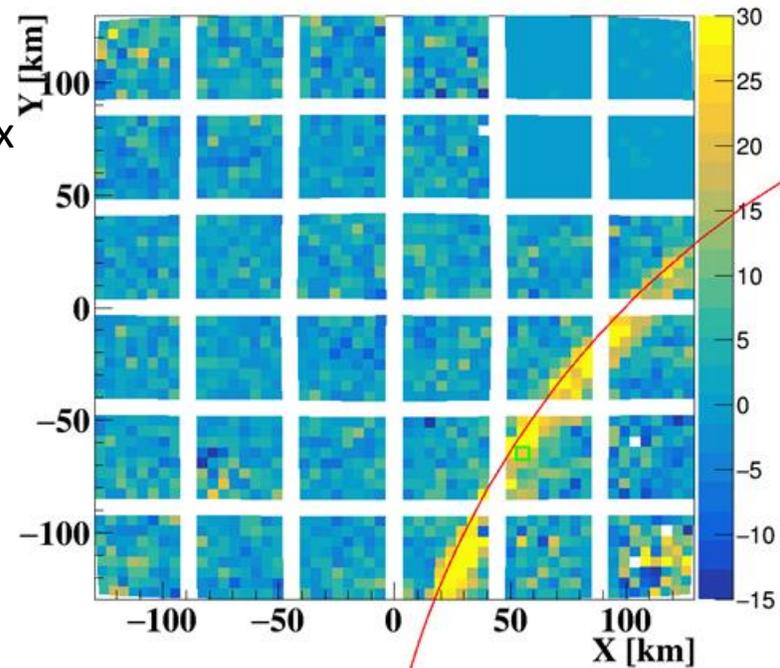
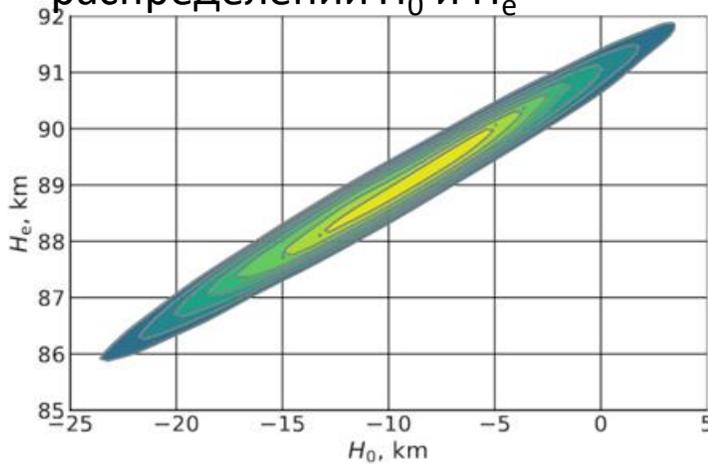


$$cT_i = cT_0 + \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + (H_d - H_e)^2} + \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (H_e - z_0)^2} + \xi_i.$$

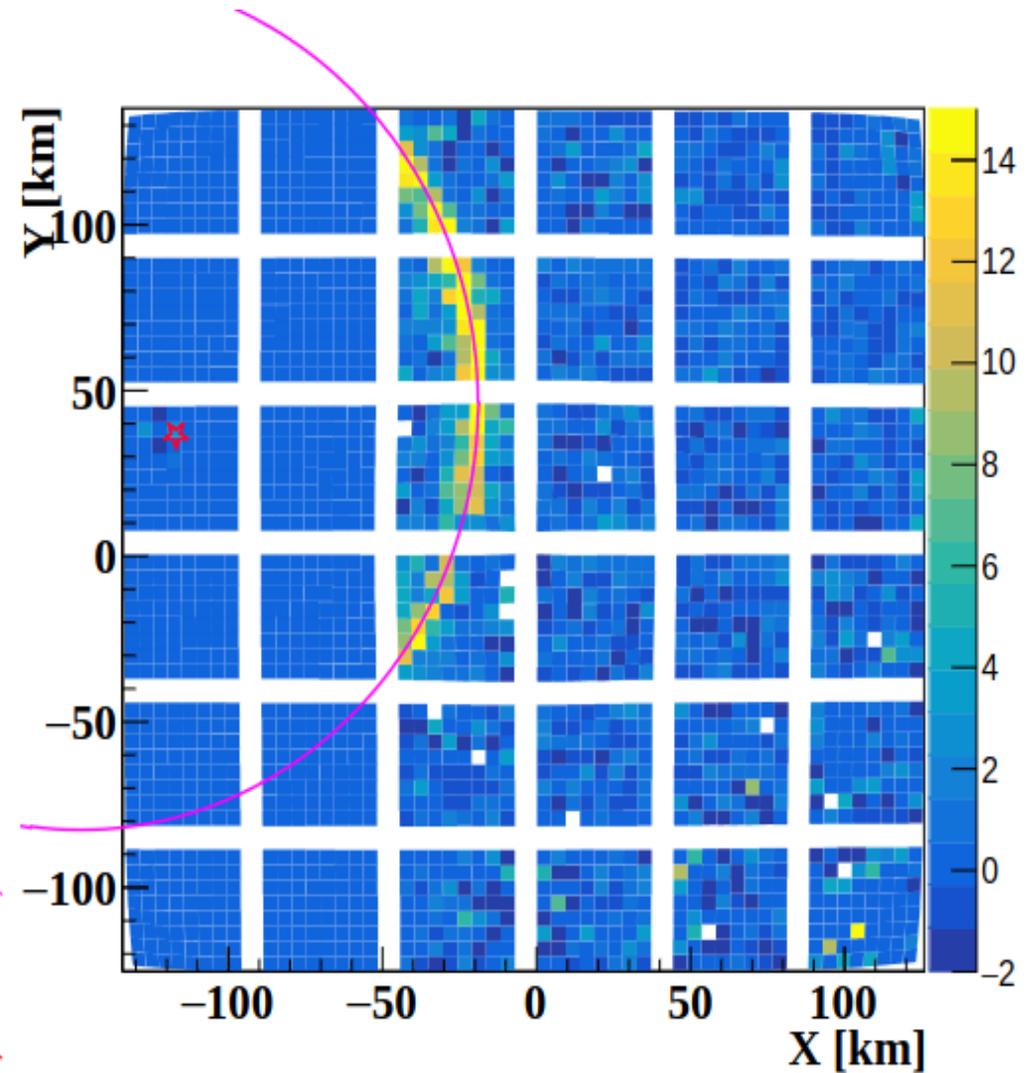
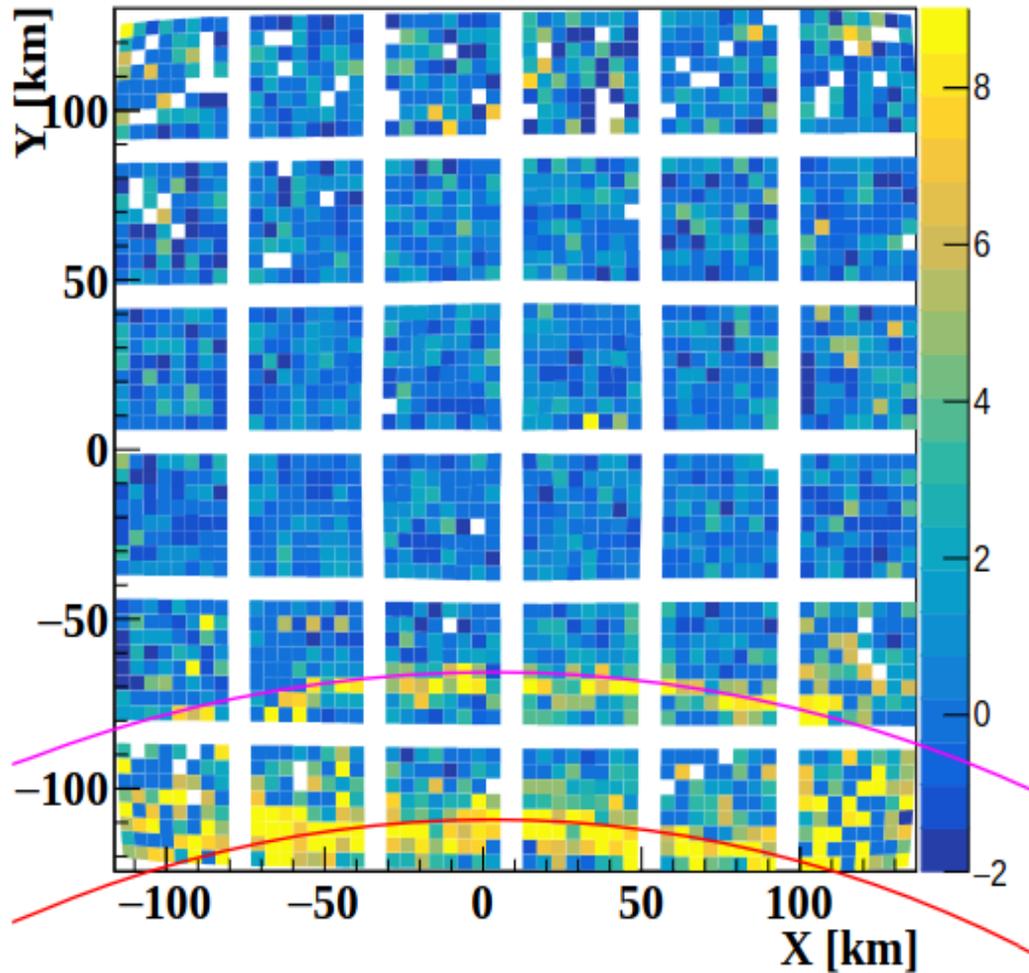
ρ_0 – radial distance to discharge
 H_0 – discharge altitude
 H_e – elves altitude



Сильная корреляция постериорных распределений H_0 и H_e



ELVES20200821, ELVES20200526

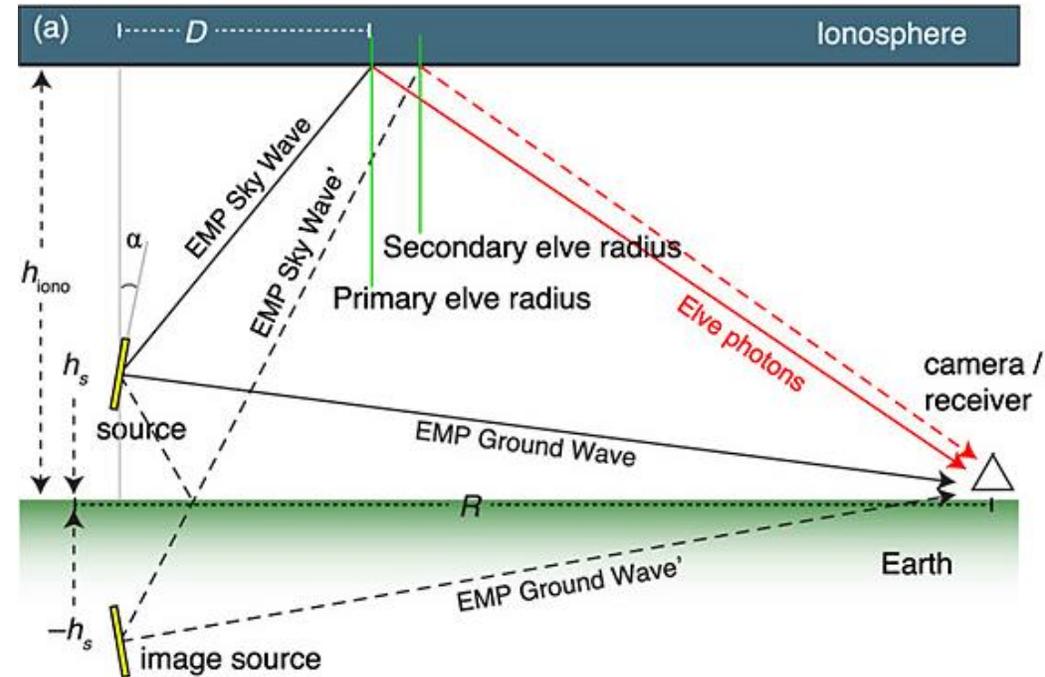


Геометрия => Кинематика => Динамика

- *Дополнительная информация:*
 - 1) локализация H_e (априорная информация),
 - 2) пики второго «отраженного» кольца (доп.данные)
- Байесовские модели позволяют формулировать реконструкцию, *не факторизуя* тот или иной тип информации
- *Следующий шаг:* Кинематика + Динамика

$$\text{Data} = \{ T_{\text{peak}}, A_{\text{peak}} \}, \Theta = \{ \dots, \alpha, \phi \}$$

Ориентация
диполя EMP



Гипотеза CID (compact intracloud discharge):
 $H_0 > 10 \text{ km}$

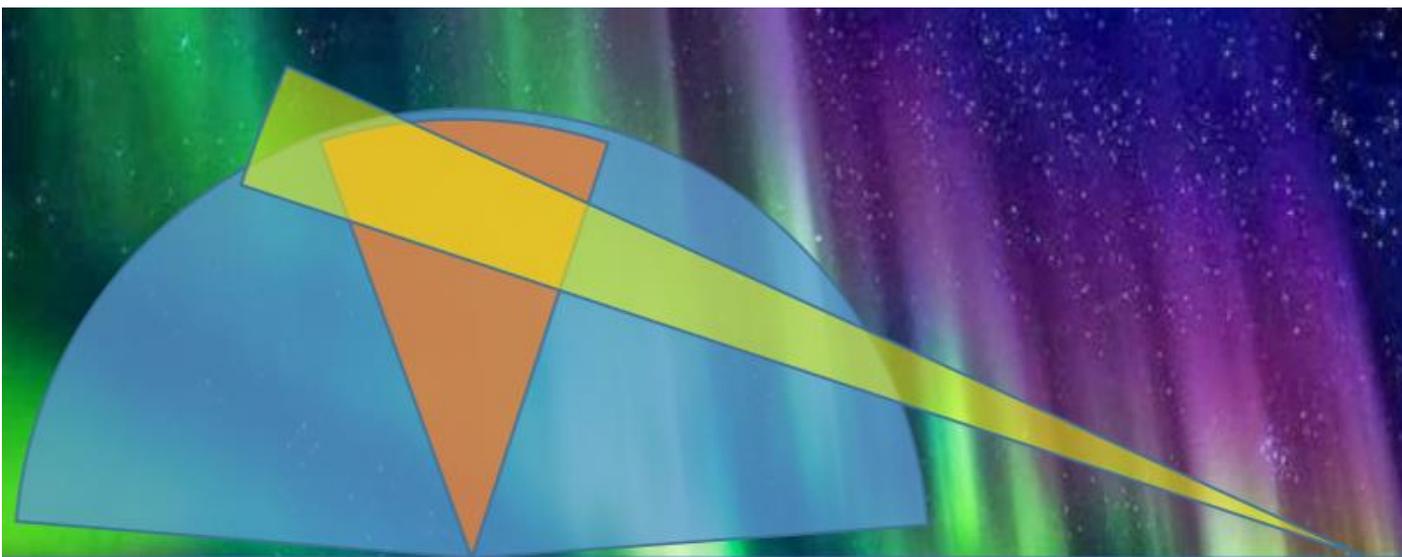
Трековые события: от КЛПВЭ до метеоров

- *Детектирование КЛ ПВЭ*: свечение ШАЛ (летащий со скоростью света «квази-метеор»)
- *«УФ атмосфера»*: > 30 000 метеоров!
- Классические методы реконструкции метеоров *не эффективны* (низкое пространственное разрешение, погрешности аппаратной функции, «мертвые» зоны, краевые эффекты,...)
- Трековое событие и его байесовская модель:
Кинематика+Динамика+Измерительный прибор!

PAIPS (Pulsating Aurora Imaging Photometers Stereoscopic System)

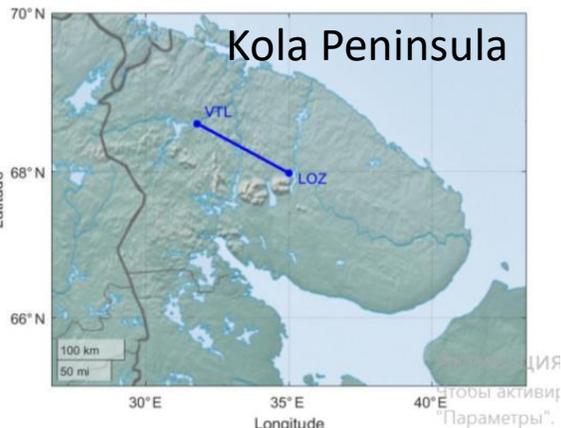
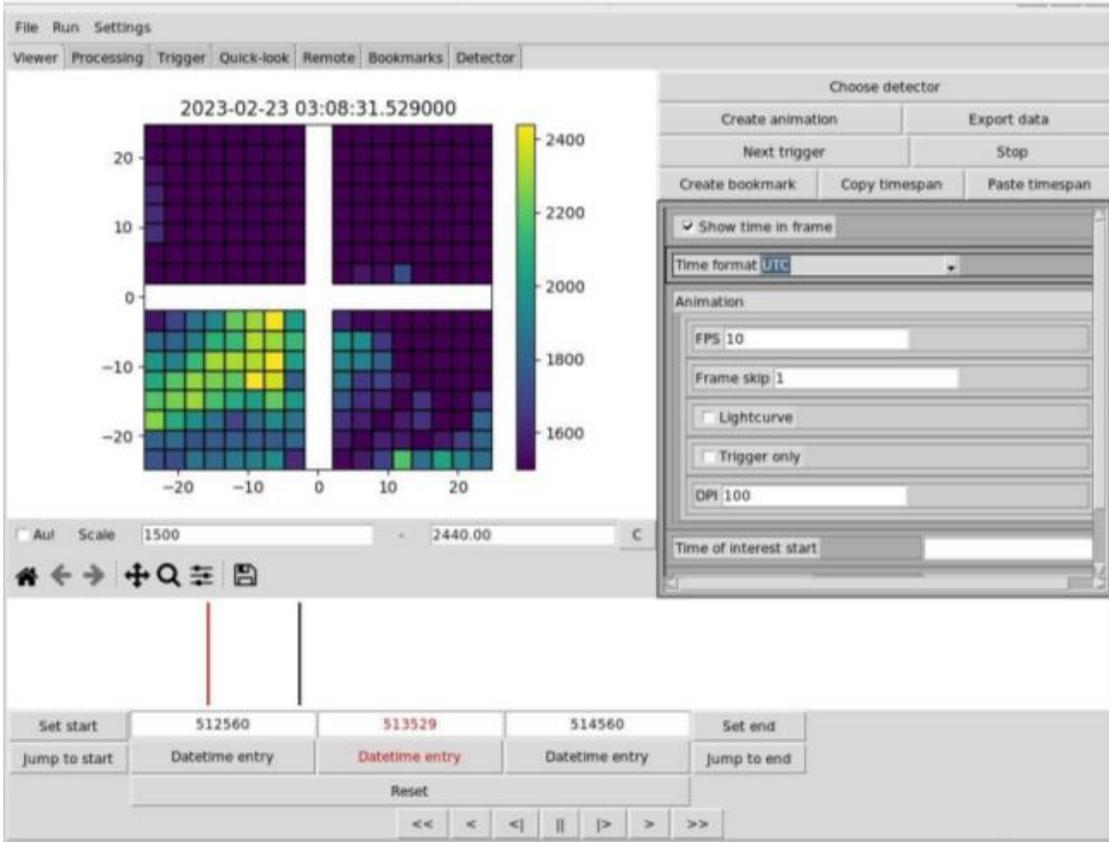
PAIPS-V (8.63 N, 31.78 E):

- 4 MAPMT (=1 EC)
 - GTU=1 ms (monitoring)
 - D=50 mm, f = 155 mm, a = 2.9 mm
- $U = 0.01 \text{ px/GTU} \Rightarrow V_{\text{hor}} = 20 \text{ km/s}$



PAIP-V

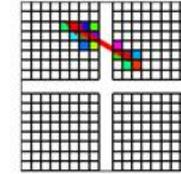
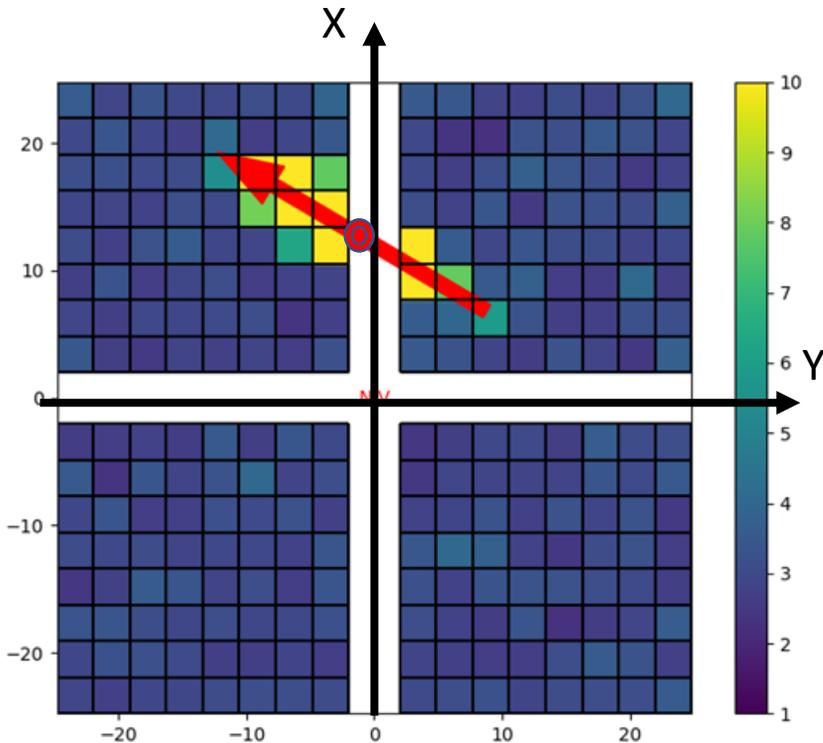
PAIP-L



PAIPS как полигон отработки алгоритмов на реальных данных

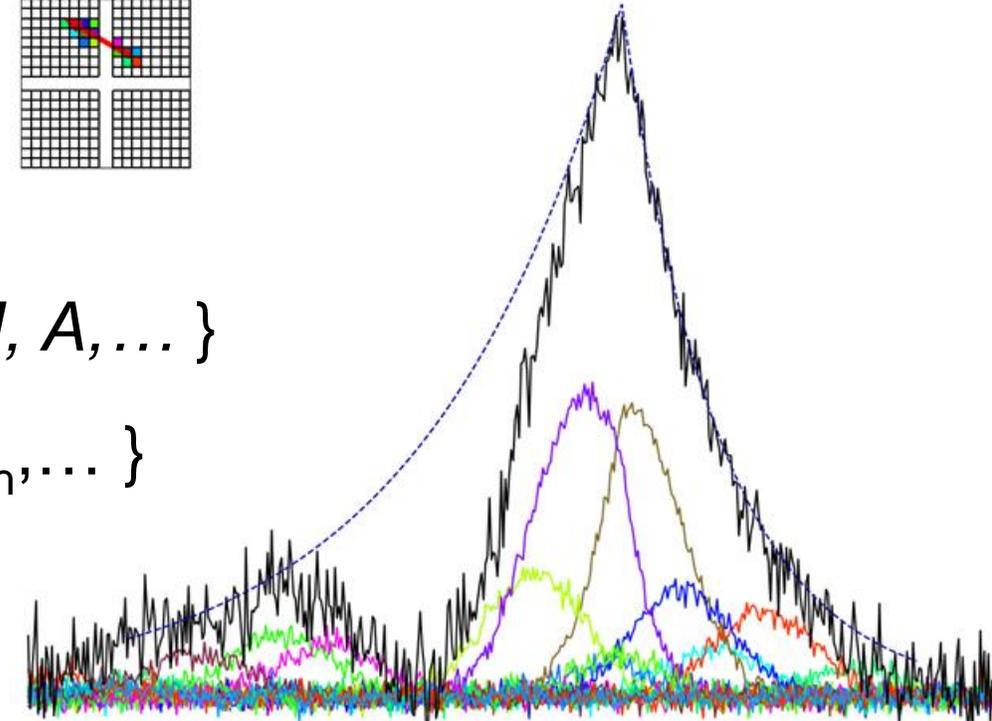
Трековые события PAIPS: MET, SAT, PLANE, STAR,...

Трековое событие: байесовская модель



$$\Theta_{\text{kin}} = \{ X_0, Y_0, \Phi, U, A, \dots \}$$

$$\Theta_{\text{dyn}} = \{ l_0, \tau_r, \tau_d, \Delta t_{\text{ch}}, \dots \}$$



Kinematics: track

$$\mathbf{R}_k = \mathbf{R}_0 + \mathbf{U}(k - k_0)\Delta t,$$

$$\mathbf{R}_0 = (X_0, Y_0)$$

$$\mathbf{U} = U(\cos \Phi, \sin \Phi)$$

$$\omega = \frac{U \sqrt{1 + (R^2/f^2) \sin^2 \Delta\Phi}}{f (1 + (R^2/f^2))}$$

Dynamics: LC-profile

Simple: CONST, LIN, EXP,...

Combined: EXP+EXP, LIN+EXP, ...

Приложение TRACK-RECO

Settings

Reconstruction Orientation Converter Track parameters calculator

Show

RA h

Dec [°]

Load point Save point

Load orientation Save orientation

N/A

23-03-17_18:38:05_track_processed_100ms_wider_correct.h5
2023-03-17 18:37:55
 $\Delta t=100.0\text{ms}$

20 10 0 -10 -20

-20 -10 0 10 20

5 10 15 20 25

Au Scale 2.29 -- 28.10 C

	SRC	parameter	median	mad	sd	eti_3%	eti
1	2023-03-1	X0	16.45	0.007	0.01	16.43	16
2	2023-03-1	Y0	13.91	0.006	0.0089	13.90	13
3	2023-03-1	SigmaPS	0.2	0.002	0.003	0.19	0.2
4	2023-03-1	E0	19.69	0.095	0.14	19.43	19
5	2023-03-1	U0	0.056	0	0	0.056	0.0
6	2023-03-1	Phi0	-1e+02	0.071	0.11	-1e+02	-1e
7	2023-03-1	Sigma0	1.01	0.008	0.012	0.99	1.0
8	2023-03-1	accel	0	0	0	0	0
9	2023-03-1	X0	10.27	0.005	0.0074	10.25	10
10	2023-03-1	Y0	-13	0.005	0.0074	-13	-13
11	2023-03-1	SigmaPS	0.17	0.002	0.003	0.16	0.1
12	2023-03-1	E0	23.73	0.1	0.15	23.46	24

Load data

Previous Next

Reconstruct

Clear traces Copy datetime

Plot trace Plot pair

A (Top left)
 B (Top right)
 C (Bottom left)
 D (Bottom right)
 M (Use entire elementary cell)
 Split chains
 Use seconds in plots

Cutter type range

Range

Start

End

Sampling normal

Draws

Tune

Chains

Random seed

Target accept

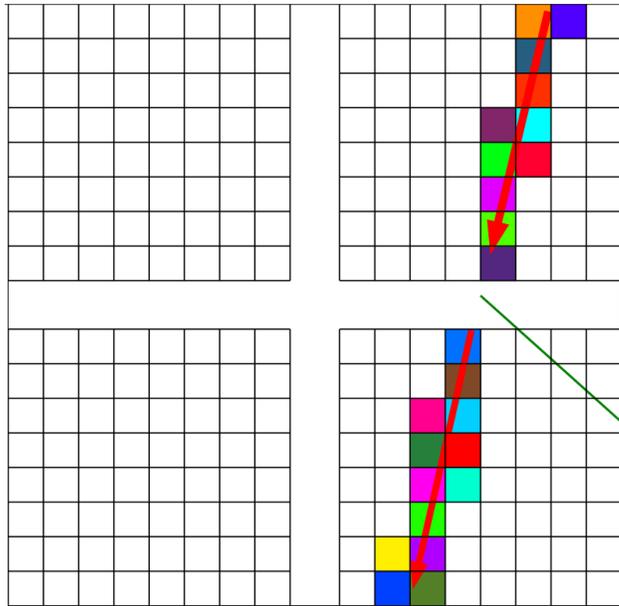
NUTS sampler pymc

Init auto

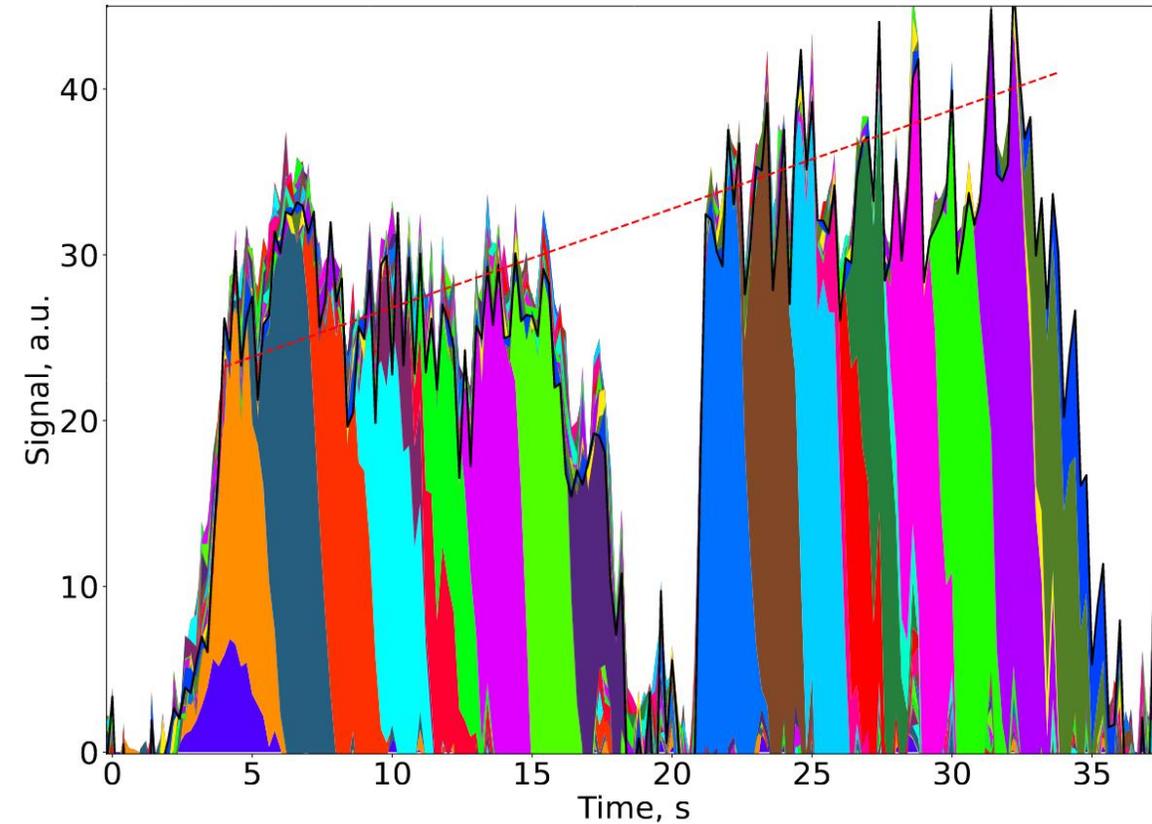
Reconstruction model linear

Load parameters Save parameters

Реконструкция спутника



$$\frac{\omega H}{v} = \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta_\omega}$$

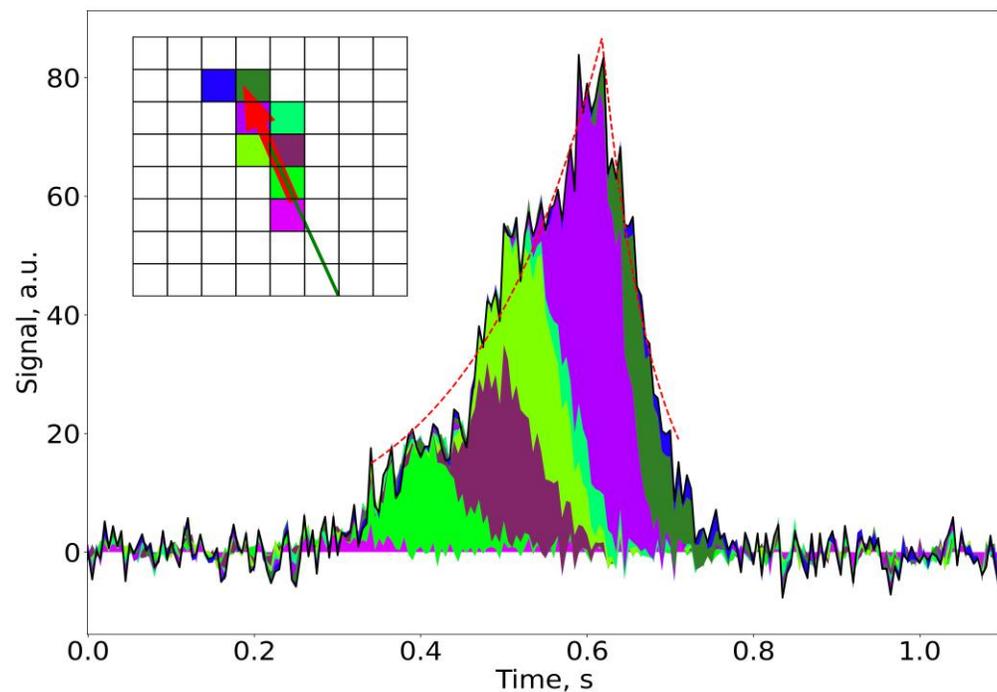


- *Satellite*: SAT183803_230317 - LANDSAT 9 (NORAD 49260), **H = 707 km**
- *Events*: 1st sub-track (13s), 2nd sub-track (13s), full track (30s)
- *Results*: ω [mrad/s] = 10.1/10.8/10.4, **H [km] = 697/683/696**

Реконструкция метеоров: Геминиды-2022

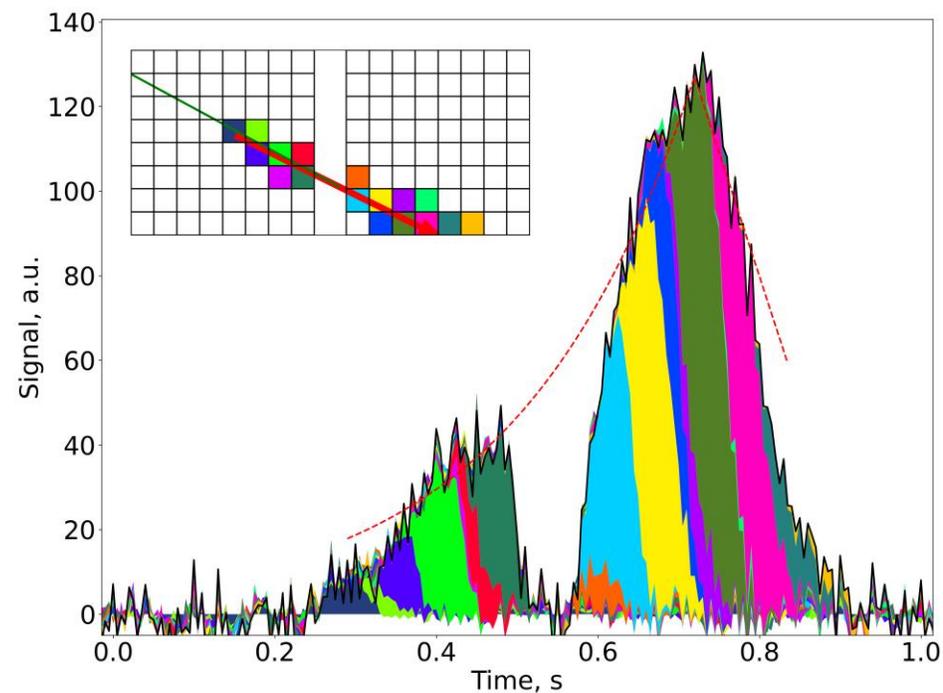
MET233739:

$\Delta\Phi = 1.6^\circ$, $\omega = 190$ mrad/s, $H_b = 93$ km



MET160247:

$\Delta\Phi = -2.5^\circ$, $\omega = 340$ mrad/s, $H_b = 98$ km



Выводы

- Для орбитального детектирования транзиентов целесообразно разрабатывать методы реконструкции, не факторизирующие часть информации («высокоточную» - ее просто нет!), а полагающуюся на совокупность (Кинематика+Динамика+Прибор).
- Низкопараметрические вероятностные (байесовские) модели, реализованные методами вероятностного программирования (PyMC, STAN,...), эффективны для реконструкции событий с относительно простым *пространственно-временным паттерном* (даже в ситуации с «плохими» данными).
- Примеры простых (но важных!) моделей являются: 1) свечение ELVES, 2) трековые события (ШАЛ, метеоры, спутники, самолеты, звезды,...)
- Работа с байесовскими моделями предполагает многоэтапный итерационный процесс (анализ результатов, проверка, модификация и сравнение моделей, выбор прайоров,...), для чего желательно создание специализированных приложений (GUI-оболочки над PyMC, ArviZ и т.п.)