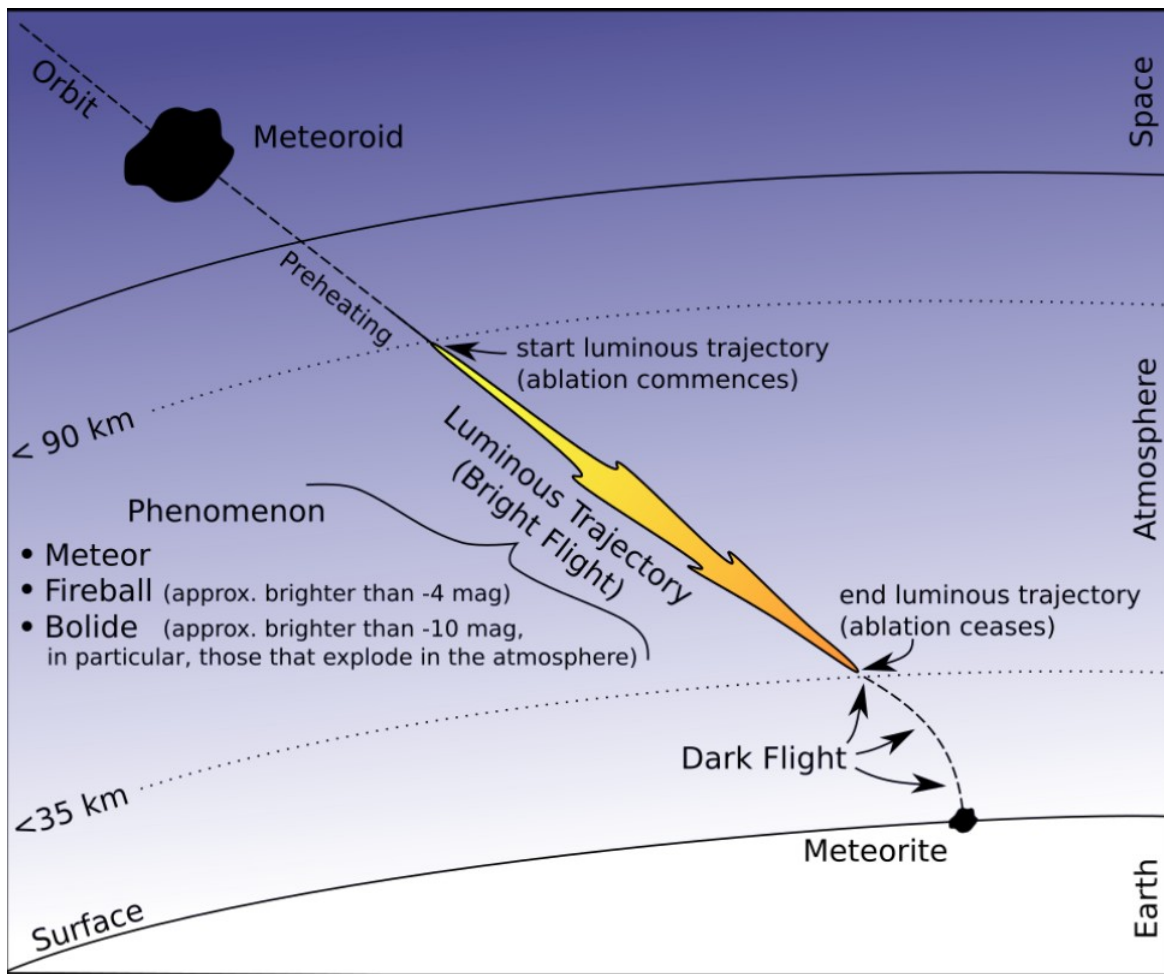


Семинар ЛКЛПВЭ

Байесовская реконструкция метеоров, зарегистрированных изображающим детектором

*Шаракин Сергей, Сараев Роман
08.05.2024*

Физика метеоров



Метеорный словарь:

- Метеороид, метеор, болид, метеорит,...
- Орбитальное движение, пред-нагрев, абляция, темный полет
- Фрагментация, вспышки, следы,...
- Поток (stream), ливень (shower), радиант (radiant), зенитное расстояние

Методы регистрации:

- Фотографический, Видеорегистрация
- Радиолокационный
- Спектроскопия

Задачи метеорной физики

- *Вычислительные задачи*: траектории движения метеора, орбиты метеороидов и родительских тел.
- *Образование метеорных потоков и их динамика* (метеоры как “отпечатки” эволюции комет и астероидов).
- *Состав и структура Солнечной системы и околоземного пространства* (метеоры как “население”).
- *Строение и химсостав метеороидов* (метеоры – как “окаменелости”).
- *Взаимодействие тел с высокой кинетической энергией с атмосферой* (горение, дробление, плавление, ионизация,... - метеоры как “снаряды”).
- *Состав и динамика верхней атмосферы, ветер,...* (метеоры как “зонды”).

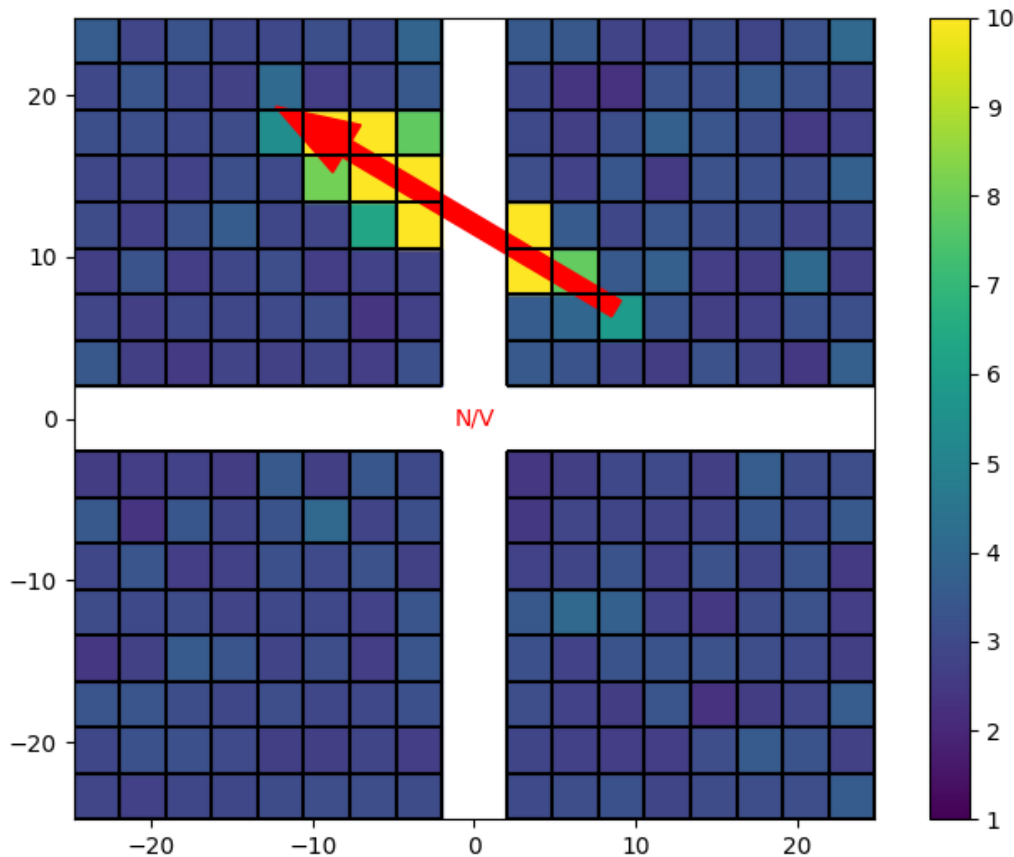
Мотивировка (1)

- “Классические” алгоритмы реконструкции метеоров: a) the intersecting planes (IP) method [Ceplecha_1987], b) the lines of sight (LoS) method [Borovička_1990], c) the multi-parameter fit (MPF) method [Gural_2012]. **Зачем же нужны другие методы?**
- Эти методы **хорошо** работают для “классических” же методов регистрации – с *высоким угловым* (пространственным) разрешением и *плохим временным*.
- **JEM-EUSO-like приборы** также нацелены на изучение трековых событий, но эта альтернативная линейка имеет *плохое угловое* разрешение и *высокое временное*. С точки зрения классических алгоритмов реконструкции мы имеем дело с **“плохими” приборами!**

Мотивировка (2)

- На самом деле в случае *динамических объектов* для реконструкции событий важно **пространственно-временное разрешение**! Факторизация на отдельное пространственное и временное разрешения не обязательны.
- Может быть наши приборы не так уж и “плохи”? Может быть *детальный тайминг* позволяет реконструировать кинематику метеора *высокоточно*?!
- Идея перехода от геометрических методов (IP и LoS) к *кинематическим* (MPF и [Vida_2020]) и даже *динамическим* (учитывающим кривую свечения, [Sansom_2017]) сейчас становятся очень **модными**.
- **Байесовский подход** - наиболее естественный выбор при формулировке полной (*кинематической+динамической+измерительной*) модели.
- И вот в этом случае детекторы PAIPS действительно можно рассматривать в качестве **“полигона байесовских алгоритмов”**: отработать в общем-то непростые методы реконструкции трековых событий с последующим их применением как в метеорной физике, так и в физике КЛПВЭ (моно-, стерео- и комбинированные детекторы,...).

Трековое событие: *кинематика*



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

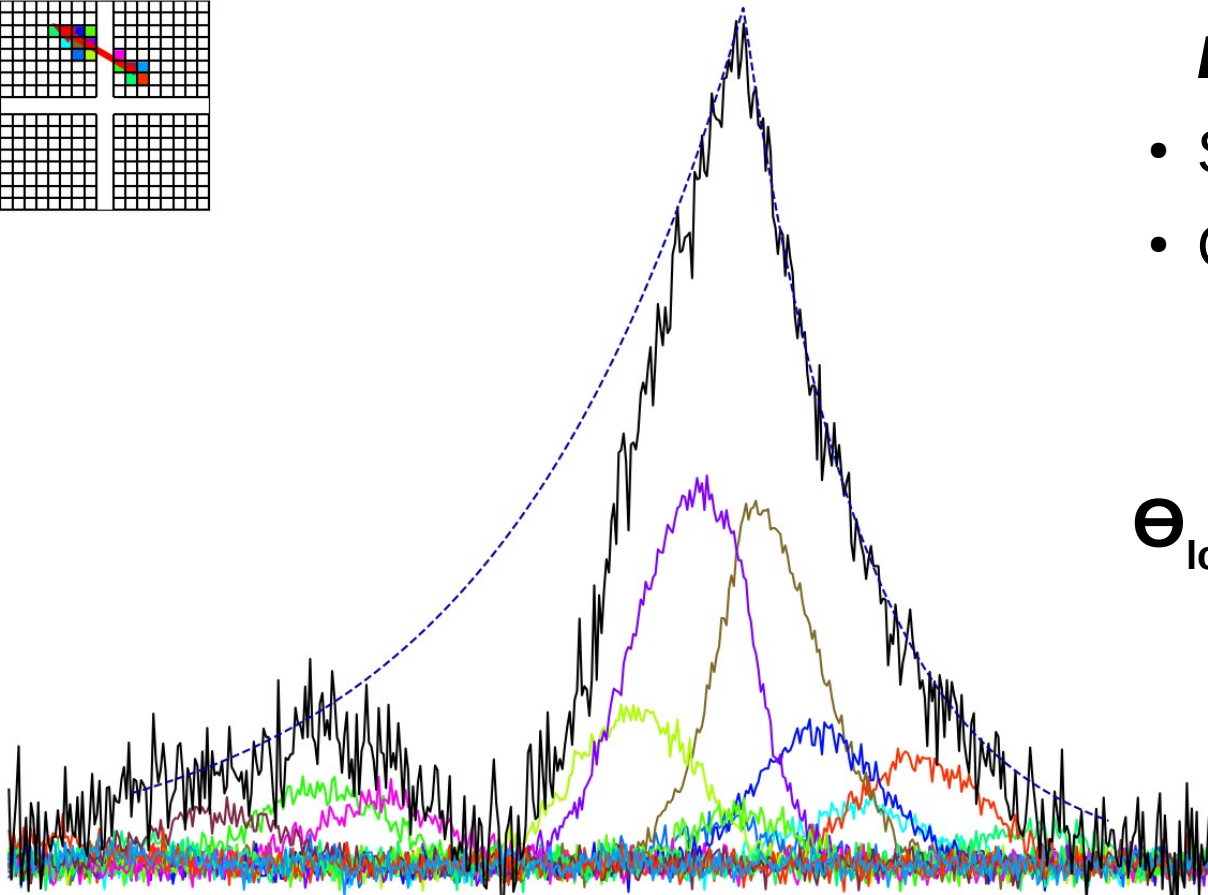
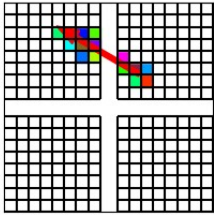
$$\mathbf{R}_0 = (X_0, Y_0)$$

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

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

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

Трековое событие: динамика



LC profiles:

- Simple: CONST, LIN, EXP,...
- Combined: EXP+EXP,...

$$\Theta_{lc} = \{ I_0, \tau_r, \tau_d, \Delta t_{sw}, \dots \}$$

Байесовская модель

$$p(\Theta_{\text{tr}}, \Theta_{\text{lc}} | \mathcal{D}) \propto p(\Theta_{\text{tr}}, \Theta_{\text{lc}}) \cdot p(\mathcal{D} | \Theta_{\text{tr}}, \Theta_{\text{lc}})$$

Прайоры (регуляризаторы): $p(\Theta_{\text{tr}}, \Theta_{\text{lc}}) = p(U) p(\Phi) p(X_0) p(Y_0) p(I_0) p(\tau) \dots$

Данные: $\mathcal{D} \equiv \{S_{ik}\}$ (i – идентификатор канала, k – номер такта)

Модель (гауссовых) **измерений:**

$$p(S_{ik} | \Theta_{\text{tr}}, \Theta_{\text{lc}}, \sigma_{\text{psf}}, \sigma_0) = \mathcal{N}(S_{ik} | I_k(\Theta_{\text{lc}}) \cdot \text{EE}_i(\mathbf{R}_k(\Theta_{\text{tr}}), \sigma_{\text{psf}}), \sigma_0)$$

Модель (гауссовой) **PSF:**

$$\text{EE}_i(\mathbf{R}) \propto \left[F\left(\frac{\Delta X_i + a/2}{\sigma_{\text{psf}}}\right) - F\left(\frac{\Delta X_i - a/2}{\sigma_{\text{psf}}}\right) \right] \cdot \left[F\left(\frac{\Delta Y_i + a/2}{\sigma_{\text{psf}}}\right) - F\left(\frac{\Delta Y_i - a/2}{\sigma_{\text{psf}}}\right) \right]$$

TRACK-RECO

Settings

Reconstruction Orientation Converter Track parameters calculator

Show

RA [h] 0.0

Dec [°] 0.0

Load point Save point

Load orientation Save orientation

STELLAR SKY

DEC [°] 0.00

RA [°] 0.00

RA [h] 0.00

DEVICE

Y [°] 117.03

ψ [°] -126.71

HORIZON

θ [°] 104.53

φ [°] 311.43

START POINT

SKY

DEC [°] 59.13

RA [°] 141.00

RA [h] 9.40

DEVICE

Y [°] 5.11

ψ [°] 100.55

HORIZON

θ [°] 10.02

φ [°] 157.25

Y (relative) [°] 113.5

ψ (relative) [°] -124.85

RECO M

SKY

DEC [°] 59.13

RA [°] 141.00

RA [h] 9.40

DEVICE

Y [°] 5.11

event02_Phi150_U20_tU100_tD50_gap_S100.h5

1970-01-01 00:00:00

Δt=1000.0ms

Autoscale Scale 2 5 C

	SRC	parameter	median	mad	sd	eti 3%	eti 97%	mcse_med	ess_medi	ess_tail
1	event02_	mu_LC_k	49.84	0.15	0.22	49.43	50.25	0.01	1596.52	1377.00
2	event02_	X0	-2.5	0.004	0.0059	-2.5	-2.5	0	1635.24	1417.00
3	event02_	Y0	13.57	0.004	0.0059	13.56	13.58	0	2035.30	1577.00
4	event02_	SigmaPS	0.42	0.001	0.0015	0.42	0.42	0	1789.34	1541.00
5	event02_	τ_L	100.56	0.47	0.7	99.31	101.84	0.018	1959.79	1453.00
6	event02_	τ_R	50.27	0.26	0.39	49.55	51.02	0.012	1501.28	1583.00
7	event02_	E0	99.48	0.28	0.41	98.76	100.23	0.014	1645.68	1378.00
8	event02_	U0	0.02	0	0	0.02	0.02	0	1889.15	1290.00
9	event02_	Phi0	149.85	0.07	0.1	149.67	150.03	0.003	1915.66	1292.00
10	event02_	Sigma0	0.99	0.004	0.0059	0.98	1.00	0	2676.42	1404.00

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

M A B C D

tau_ert nairnormal

HalfNormal

sigma 100.0

Negative

tau_right halfnormal

HalfNormal

sigma 100.0

Negative

mu_k0 normal

Normal

mu 0

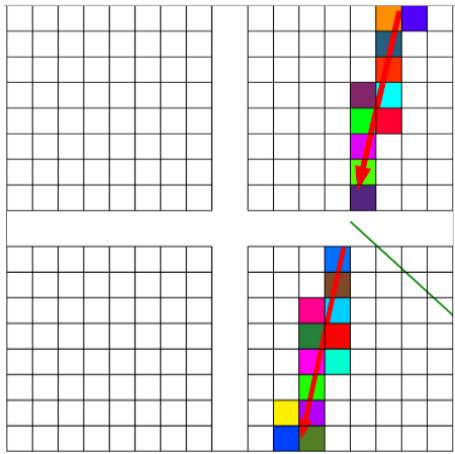
sigma 100.0

ee_steps 1

Distribution normal

Load parameters Save parameters

Реконструкция спутников



$$H = v \cos^2 \theta / \omega_{\text{hor}}$$

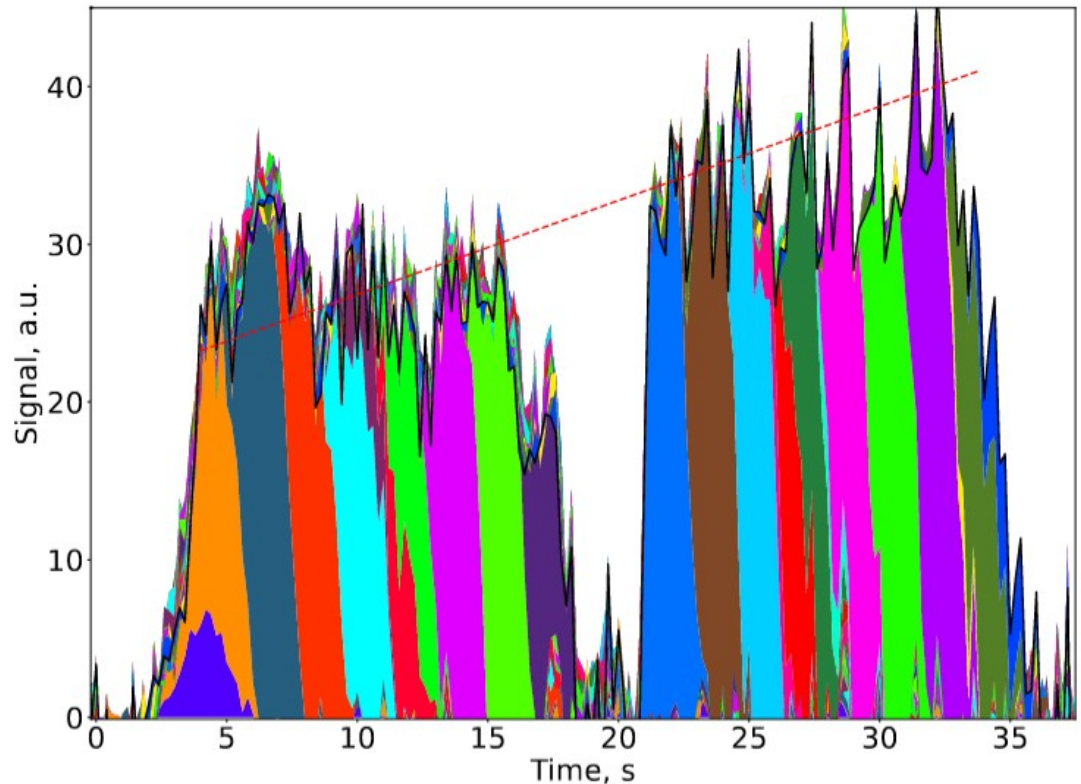
$$v = v_1 / \sqrt{1 + H/R_E}$$

Event: SAT183803_230317

$$\omega_1 = 10.1 \text{ mrad/s} \Rightarrow H_1 = 673 \text{ km}$$

$$\omega_2 = 10.8 \text{ mrad/s} \Rightarrow H_2 = 681 \text{ km}$$

$$\omega_{12} = 10.4 \text{ mrad/s} \Rightarrow H_{12} = 683 \text{ km}$$



LANDSAT 9: H = 707 km

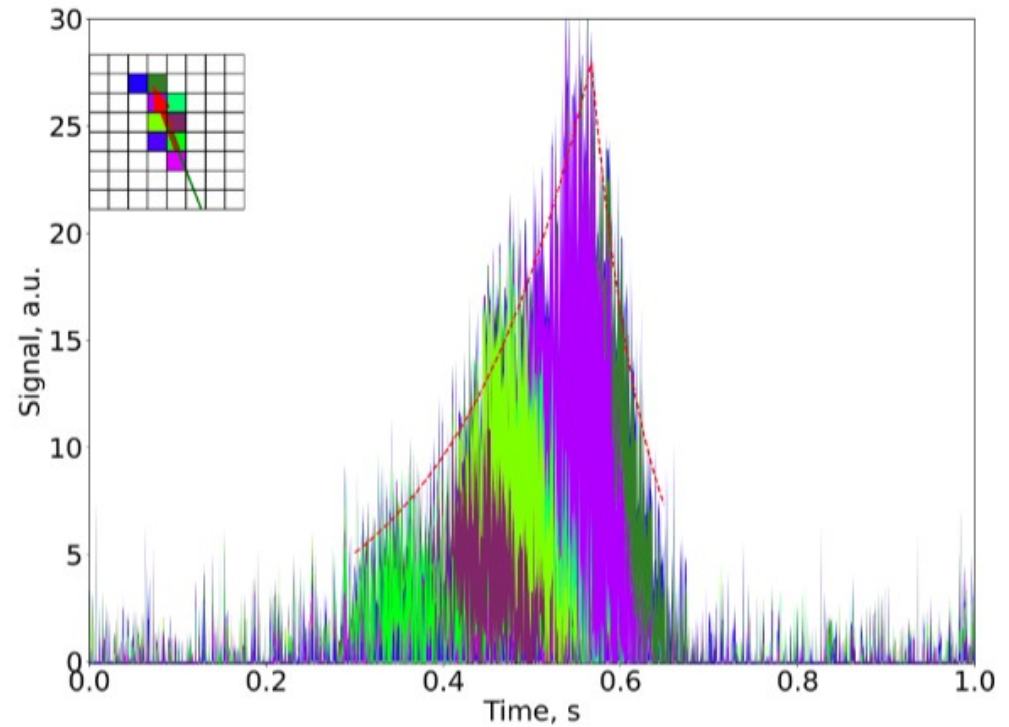
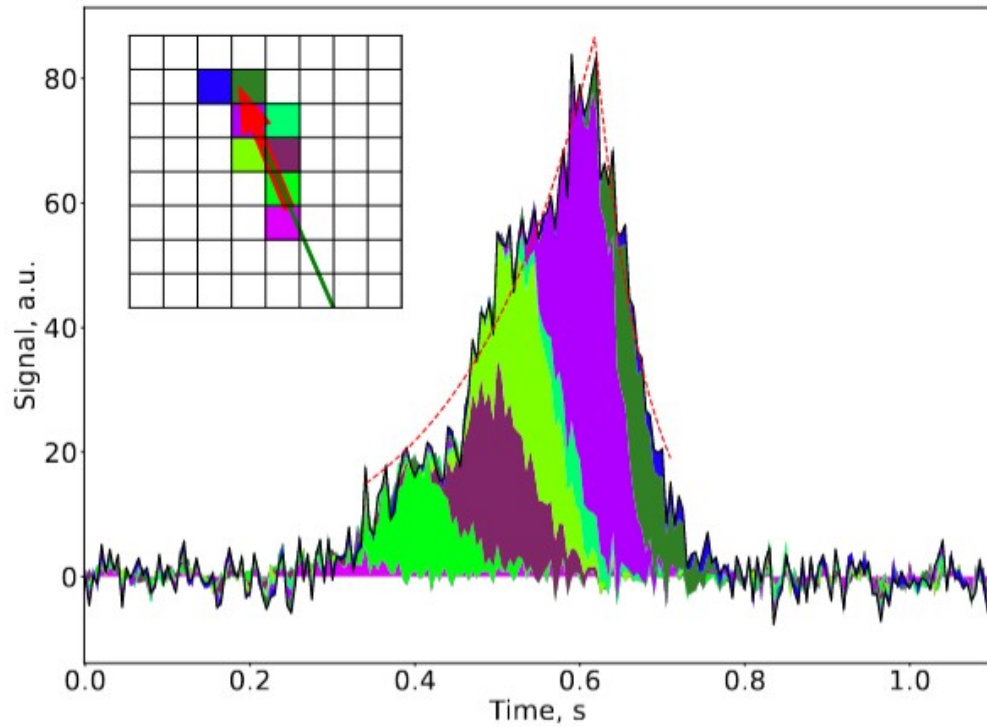
Реконструкция Геминид-2022

Ночь 12/13 декабря 2022 г. - пик Геминид (Ra=112, Dec=32.5)

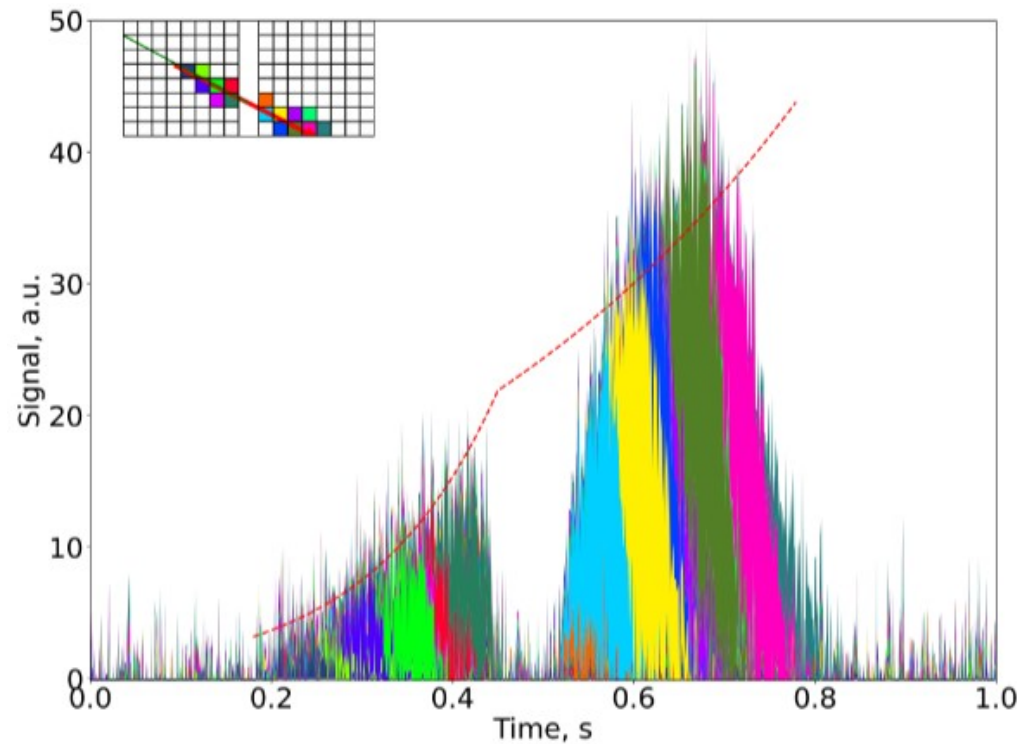
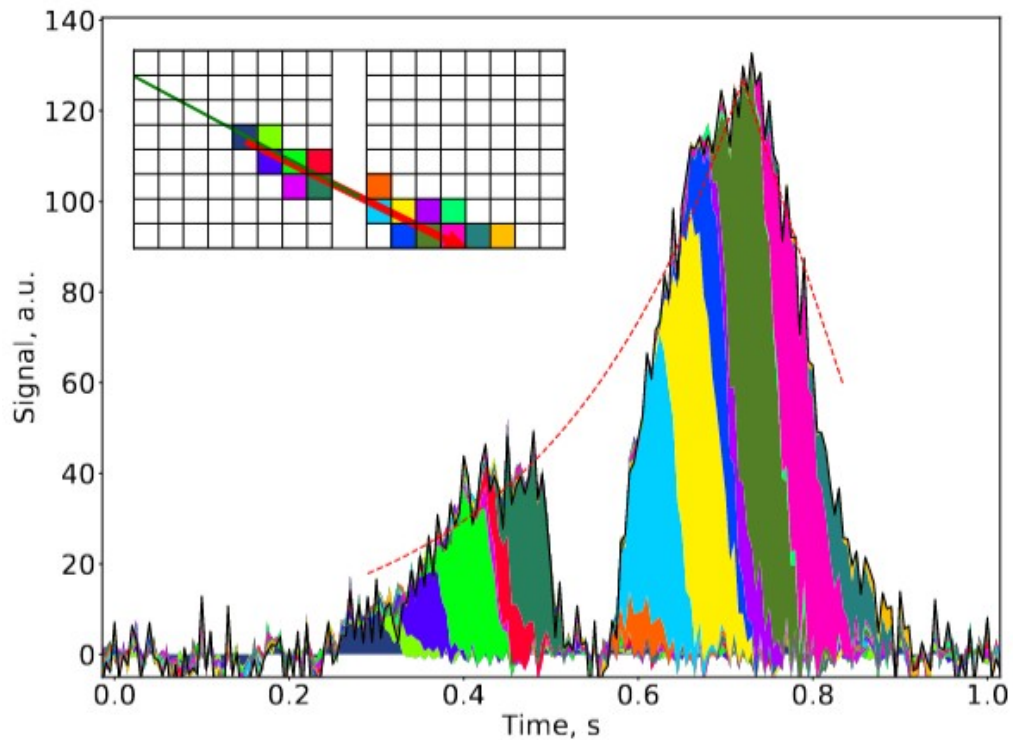
$$H = v \sin \alpha \cos \theta / \omega$$

Event	profile	$\alpha, ^\circ$	$\Delta\Phi, ^\circ$	$\omega, \text{rad/s}$	$\Delta T, \text{s}$	$H_{\text{max}}, \text{km}$	$H_b - H_e, \text{km}$
MET155831	LIN	78.3	-1.1	0.387	0.27	86.8	88.8* - 85.5*
MET160247	EXP-EXP	78.0	-1.3	0.343	0.64	90.0	96.3 - 88.4*
MET165207	EXP	77.0	-2.8	0.343	0.36	89.8	94.0 - 88.8*
MET171644	EXP	62.0	-2.7	0.???	0.52	95.5	96.4* - 88.2
MET192328	EXP-EXP	48.6	-0.7	0.274	0.70	88.6	97.1 - 81.9
MET233734	EXP-EXP	28.6	1.1	0.190	0.47	84.1	94.0 - 80.6
MET014015	EXP-EXP	30.8	-3.0	0.203	0.75	82.9	92.7-??
MET040604	EXP-EXP	58.2	-1.1	0.311	0.52	89-91	97.2 - 85.6
MET040851	GAUS	48.7	-5.0	0.274	0.46	89.5	93.8* - 83.6
	EXP-EXP	48.0	-3.7	0.279	0.46	86.6	90.6* - 80.4

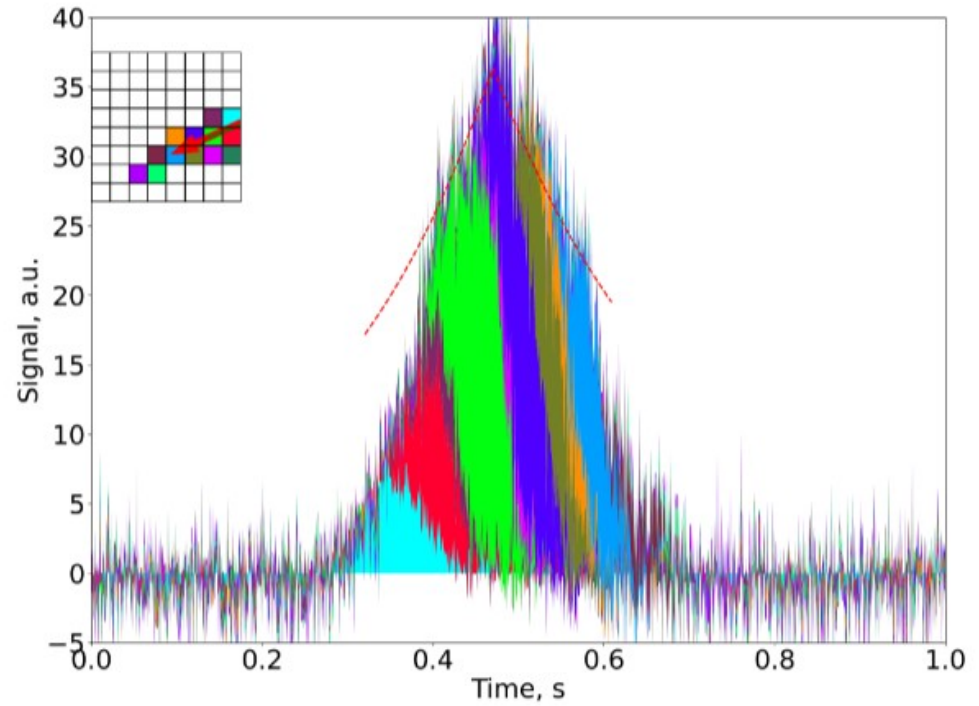
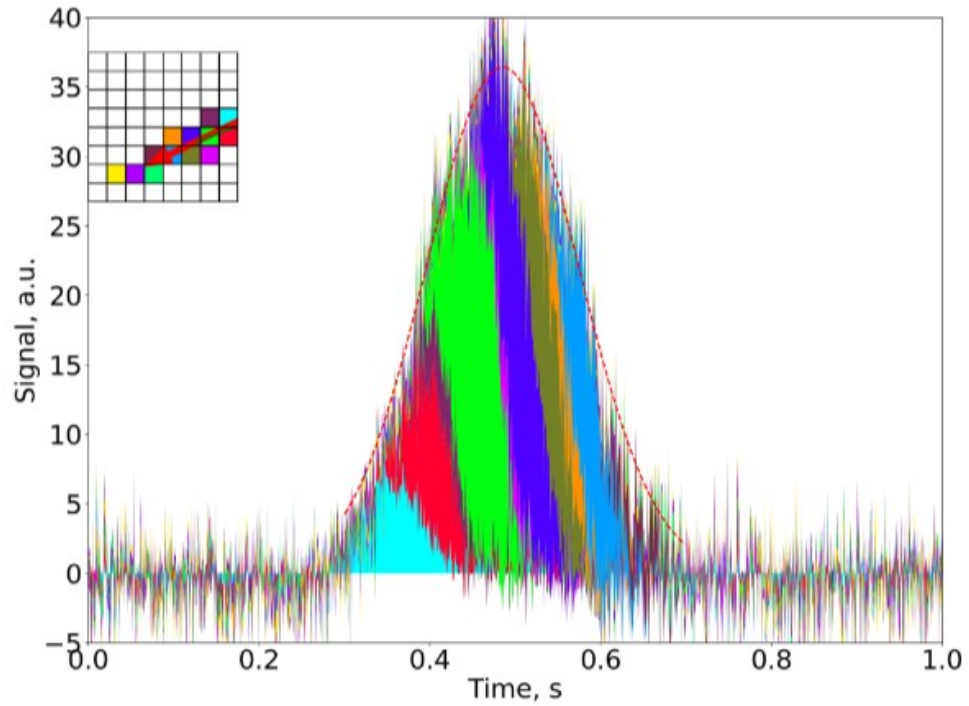
Event: MET233734



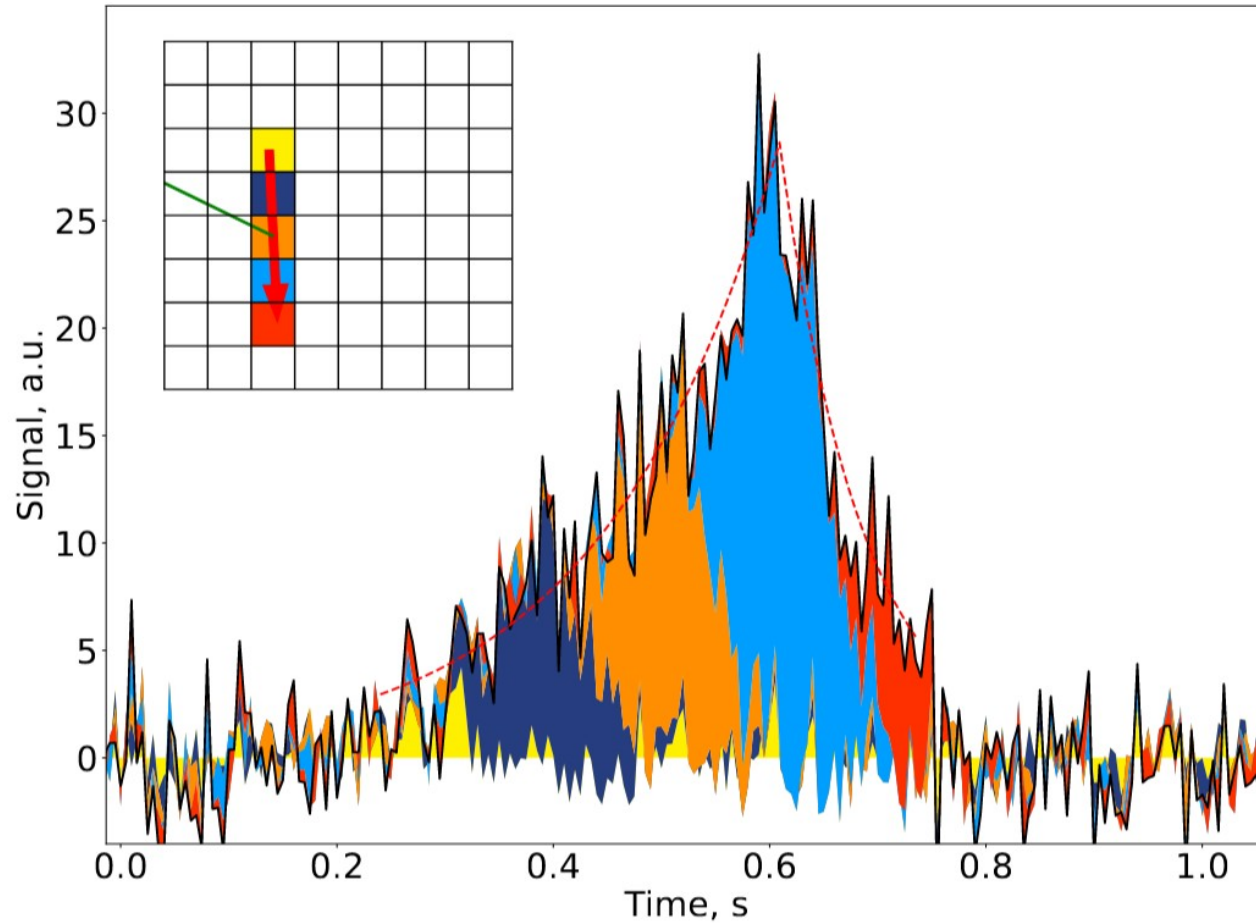
Event: MET160247



Event: MET040851



Event: MET155747



УФ-БЛЕСК Геминид-2022

Event	УФ-Блеск		$\Delta\Phi, ^\circ$	$\omega, \text{rad/s}$	$\Delta T, \text{s}$	$H_{\text{max}}, \text{km}$	$H_b - H_e, \text{km}$
МЕТ155831	1.76		-1.1	0.387	0.27	86.8	88.8* - 85.5*
МЕТ160247	2.71		-1.3	0.343	0.64	90.0	96.3 - 88.4*
МЕТ165207	2.61		-2.8	0.343	0.36	89.8	94.0 - 88.8*
МЕТ171644	3.18		-2.7	0.???	0.52	95.5	96.4* - 88.2
МЕТ192328	2.95		-0.7	0.274	0.70	88.6	97.1 - 81.9
МЕТ233734	1.21 (-0.74 в пике)		1.1	0.190	0.47	84.1	94.0 - 80.6
МЕТ014015	0.45 (-2.05 в пике)		-3.0	0.203	0.75	82.9	92.7-??
МЕТ040604	2.95		-1.1	0.311	0.52	89-91	97.2 - 85.6
МЕТ040851	1.76		-5.0	0.274	0.46	89.5	93.8* - 83.6
	EXP-EXP	48.0	-3.7	0.279	0.46	86.6	90.6* - 80.4

Модификации модели

- *Модель LC*: комбинированные профили
- *Модель ошибок измерения*: Gaus => StudentT
- *Модель PSF*: varying PSF (linear), non-gaussian PSF, PSF calibration (?)
- Полу-автоматическая *пред-реконструкция* (CONST-LC)
- *Учет априорной информации*: потоковые метеоры, спутники, ШАЛ,...

Проверка модели

- *Анализ результатов сэмплирования (posteriors)*
- *Predictive check (new Data)*
- *Sensitivity check: LC profiles, PSF, non-square pixels, non-uniform sensitivities*
- *Статистический анализ модельных примеров*
- **СВЯЗКА: PADAMO => TRACK-RECO**

PADAMO-RS

File Run Settings

Viewer

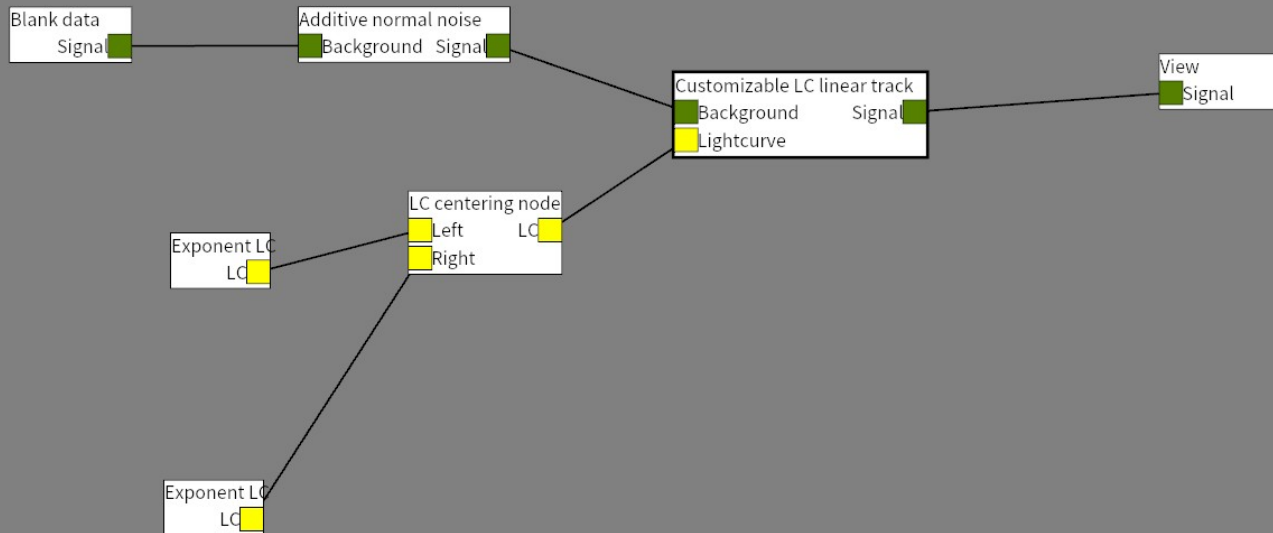
Editor

Trigger

Signal plotter

Detector manager

- + Application
- Artificial data
 - Additive normal
 - Basic linear track
 - Blank data
 - Customizable LC
- + Base triggers
- + Constants
- + Data Processing
- + File path
- + Flat fielding
- + Functions
- + HDF5
- + IO
- + MAT
- + Signal
- + Trigger



- Constants
- pivot_frame 300
 - v0 0.0570
 - a0 0
 - phi0 150
 - x0 -5
 - y0 15
 - sigma_x 1.2
 - sigma_y 1.2
 - motion_blur_steps 5
 - default_length 100

Калибровка по блеску

- Count Rate c – сигнал в канале выраженный в отсчетах (counts), будем обозначать его $c_i(k)$. (Иногда идентификатор канала i и номер такта k будем опускать.)
- Photon Rate n – модельное значение сигнала, отражающее (в общем случае) нелинейную зависимость count rate от интенсивности входного сигнала и связанную с процессами, происходящими в электронике канала.
- Intensity I – интенсивность сигнала, которая может измеряться как на входе в пиксель (и тогда совпадает с photon rate), так и на входе в детектор, т.е. характеризовать освещенность входного зрачка. В последнем случае она наиболее полезна при оценке сигнала от точечного объекта...

$$c(t) = c_0 n(t) \exp(-n(t)/\tau) \quad n(t) = F(\dot{c}(t)|c_0, \tau).$$

Первая стадия: *относительная чувствительность*

1. Выбрать достаточно протяженный интервал времени, в котором регистрация сигналов детектором происходила в спокойных квази-стационарных условиях (без вспышек, полярных сияний и т.п.).
2. Рассчитать для каждого канала сигнал Photon rate как $n_i(t) = F(c_i(t)|c_{0i}, \tau_i)$.
3. Рассчитать медианные значения этих сигналов на всем выбранном интервале времени, $m_i = \text{median}_k\{n_i(k)\}$.
4. Получить значения коэффициентов s_i как отношение m_i к усредненному по большому набору «хороших» каналов значению:

$$s_i = m_i / \langle m \rangle, \quad \langle m \rangle \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i$$

В качестве хороших каналов можно взять все не-периферийные пиксели (за вычетом тех, что не работают или работают не стабильно).

Вторая стадия: *калибровка по звездам*

1. Подобрать интервал времени, на котором в данных детектора идентифицируется трек звезды, желательно – на относительно спокойном и устойчивом фоне.
2. Осуществить пересчет Count Rate в Photon Rate в соответствии с $n_i(t) = F(c_i(t)|c_{0i}, \tau_i)$ для всех каналов, содержащих сигнал от звезды (будем называть такие каналы *активными*).
3. Подбрав необходимый сдвиг (bias) n_{0i} , рассчитать интенсивность активного сигнала в каждом активном канале:

$$I_i(t) = (n_i(t) - n_{0i})/s_i$$

В отдельных случаях может понадобиться линейная аппроксимация фонового уровня $n_{0i}(t)$.

4. Вычислить для каждого момента времени суммарный сигнал от звезды как сумму

$$I_{\text{star}}(t) = \sum_i I_i(t)$$

(рекомендуется ограничиться суммой сигналов 9-ти каналов – максимума и окружающих его). Оценить среднее значение интенсивности за выбранный интервал времени (длительностью K тактов), $\langle I_{\text{star}} \rangle = \frac{1}{K} \sum_k I_{\text{star}}(k)$.

5. Вычислить коэффициент I_0 , позволяющий связать полученную интенсивность свечения звезды с блеском, $m_U = -2.5 \lg(\langle I_{\text{star}} \rangle / I_0)$,

$$I_0 = \langle I_{\text{star}} \rangle \cdot 10^{0.4m_U},$$

где $m_U = m_V + CI_{B-V} + CI_{U-B}$ – звездная величина в полосе U.