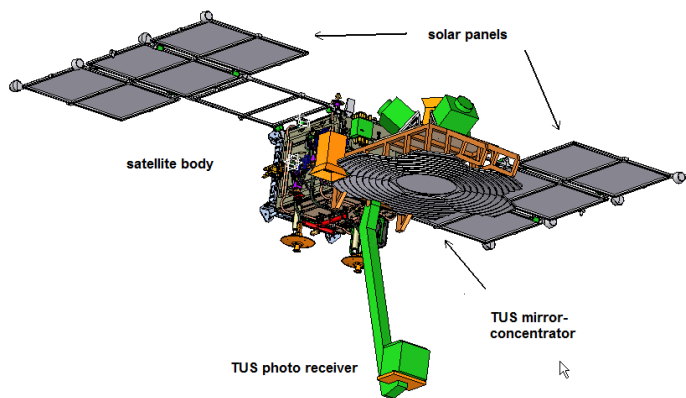


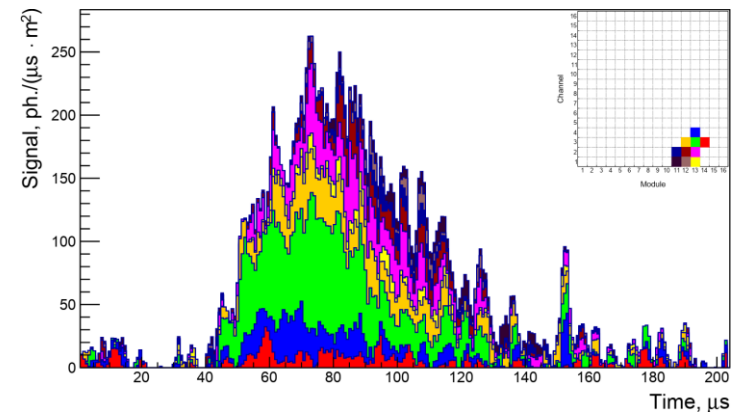


ДЕТЕКТИРОВАНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПЫЛИНОК С ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЫ

Шаракин С.А.¹, Oliver I. Ruiz-Hernandez², Климов П.А.¹, Зотов М.Ю.¹

¹НИИЯФ МГУ, Россия, Москва

²Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Avenida San Claudio y 18 Sur, C.P. 72570, Puebla, México



Памяти Б.А. Хренова посвящается

В журнал Космические Исследования

Б. А. Хренов, П.А. Климов, М.И. Панасюк, Н.Н. Калмыков, С.А. Шаракин и М. Ю. Зотов

Релятивистские пылинки как объект исследования с помощью орбитального флуоресцентного детектора «ТУС»

Краткое содержание

В статье обсуждаются результаты поиска космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ) с помощью орбитального флуоресцентного телескопа ТУС. Телескоп «ТУС» на борту спутника «Ломоносов» — это инструмент-первопроходец для нескольких крупномасштабных космических детекторов КЛ ПВЭ, готовящихся международными коллаборациями с целью изучения космических лучей с энергиями, превышающими предел Грейзена-Зацепина-Кузьмина (предел ГЗК). В данных детектора «ТУС» было выбрано несколько событий с характеристиками, ожидаемыми для таких высоких энергий. В одном из них (событие TUS161003) первичная энергия была измерена как $E_0 = 1,0 \pm 0,2$ ЭэВ, что не согласуется с данными об интенсивности таких событий, полученными на наземных детекторах. В настоящей статье это разногласие преодолевается предложением о существовании нетрадиционных первичных космических объектов — массивных частиц космической пыли, движущихся со скоростью, близкой к скорости света. Новые первичные объекты имеют дополнительный параметр — число нуклонов в их составе в момент встречи с атмосферой Земли, вариации которого дают новые экспериментальные характеристики вторичного события в атмосфере. Рассмотрены события в атмосфере от релятивистских пылинок, состоящих из ядер кремния или железа, известных, как наиболее часто встречающийся вид метеороидов. Новые характеристики флуоресценции атмосферы, связанные с большим числом нуклонов, составляющих пылинки с энергией на нуклон ~ 10 ГэВ.

Relativistic dust grains: a new subject of research with orbital fluorescence detectors

B.A. Khrenov, N.N. Kalmykov, P.A. Klimov,* S.A. Sharakin and M.Yu. Zotov

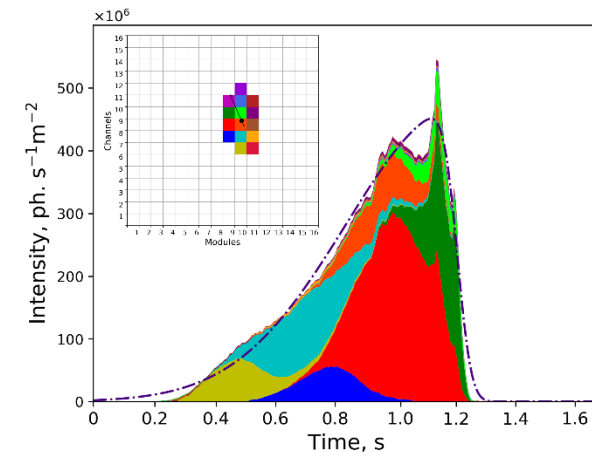
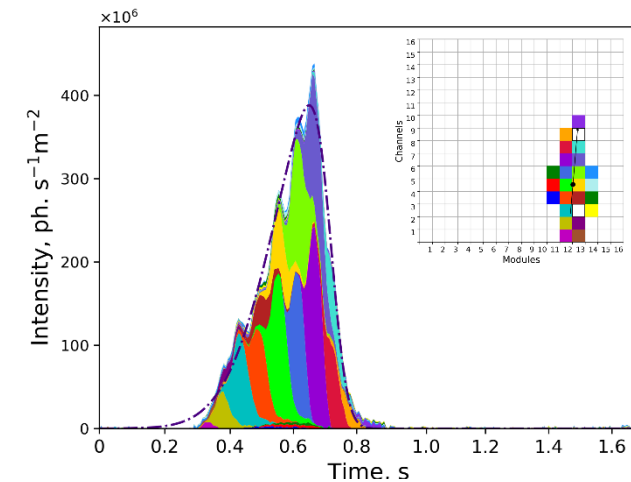
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

E-mail: bkhrenov@yandex.ru, pavel.klimov@gmail.com

TUS (Tracking Ultraviolet Set-up) was the world's first orbital detector aimed at testing the principle of observing ultra-high energy cosmic rays (UHECRs) with a space-based fluorescence telescope. TUS was launched into orbit on 28th April 2016 as a part of the scientific payload of the Lomonosov satellite, and its mission continued for 1.5 years. During this time, its exposure reached $\sim 1550 \text{ km}^2 \text{ sr yr}$ for primary energy $\gtrsim 400 \text{ EeV}$, and a number of extensive air showers-like events were registered. The shape and kinematics of the signal in these events closely resembled those expected from UHECRs but amplitudes of the signal and some other features were in contradiction with this assumption. A detailed analysis of one of EAS-like events (TUS161003) revealed that a primary cosmic ray would need to have an energy $\gtrsim 1 \text{ ZeV}$ in order to produce a light curve of the observed amplitude, which is incompatible with the cosmic ray spectrum obtained with ground-based experiments. More than this, the slant depth of the shower maximum be the signal produced by a cosmic particle, was estimated as $\lesssim 500 \text{ g/cm}^2$, which corresponds to cosmic rays around 1 PeV. We present a preliminary discussion of a hypothesis that the TUS161003 event and perhaps some other bright EAS-like events could be produced by relativistic dust grains, which were considered a possible component of the cosmic ray flux beyond the GZK cut-off some time ago.

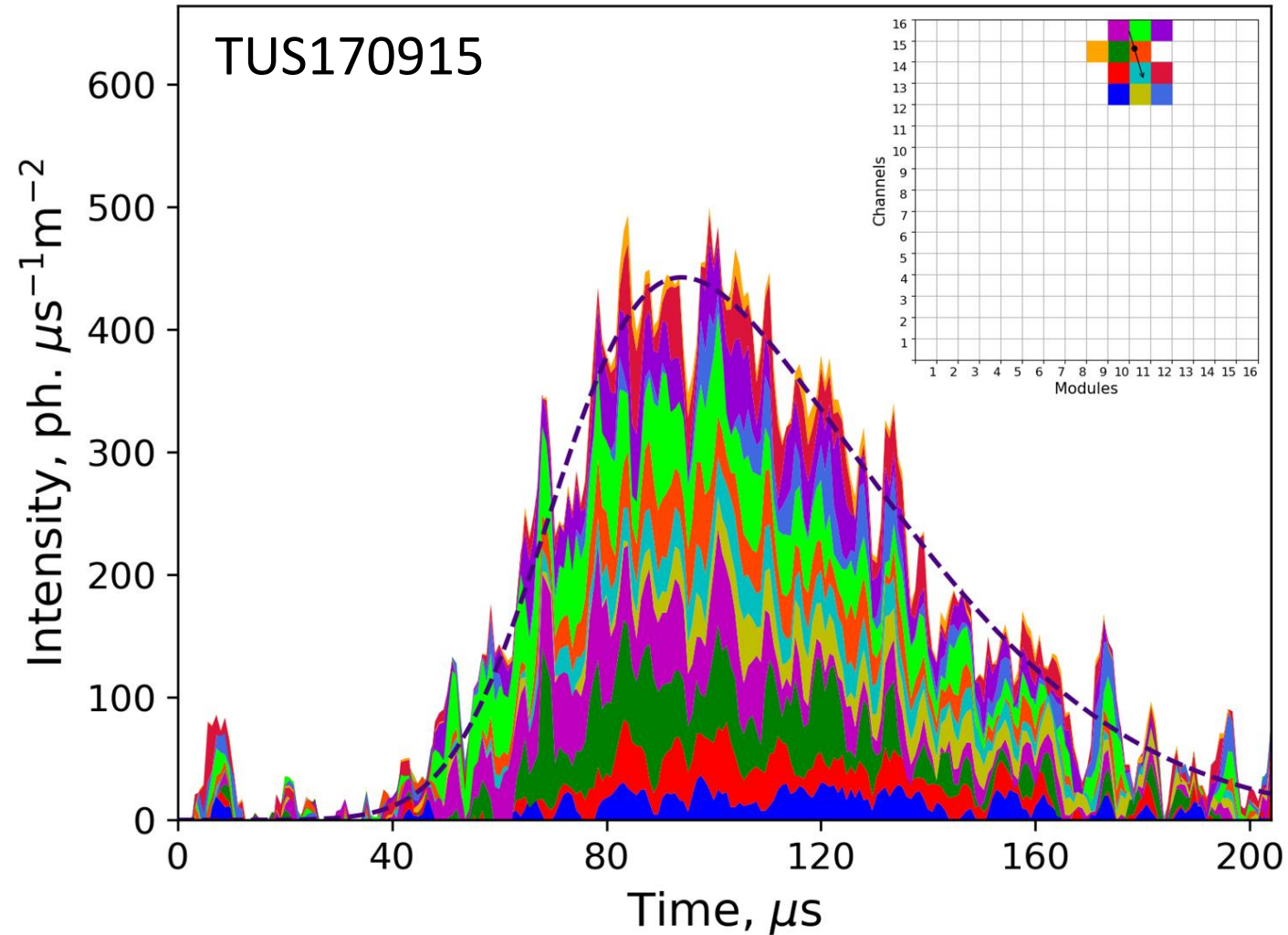
Детектор «ТУС» и его «необычные» события

- Мгновенные треки (от попадания заряж.частиц в фотоприемник).
- Транзиентные свечения по типу ELVEs.
- Грозовые вспышки.
- Метеоры (и болид).
- Медленные вспышки (и др. вариации фона).
- **Экзотика (EAS-like events, Gigantic event,...)**



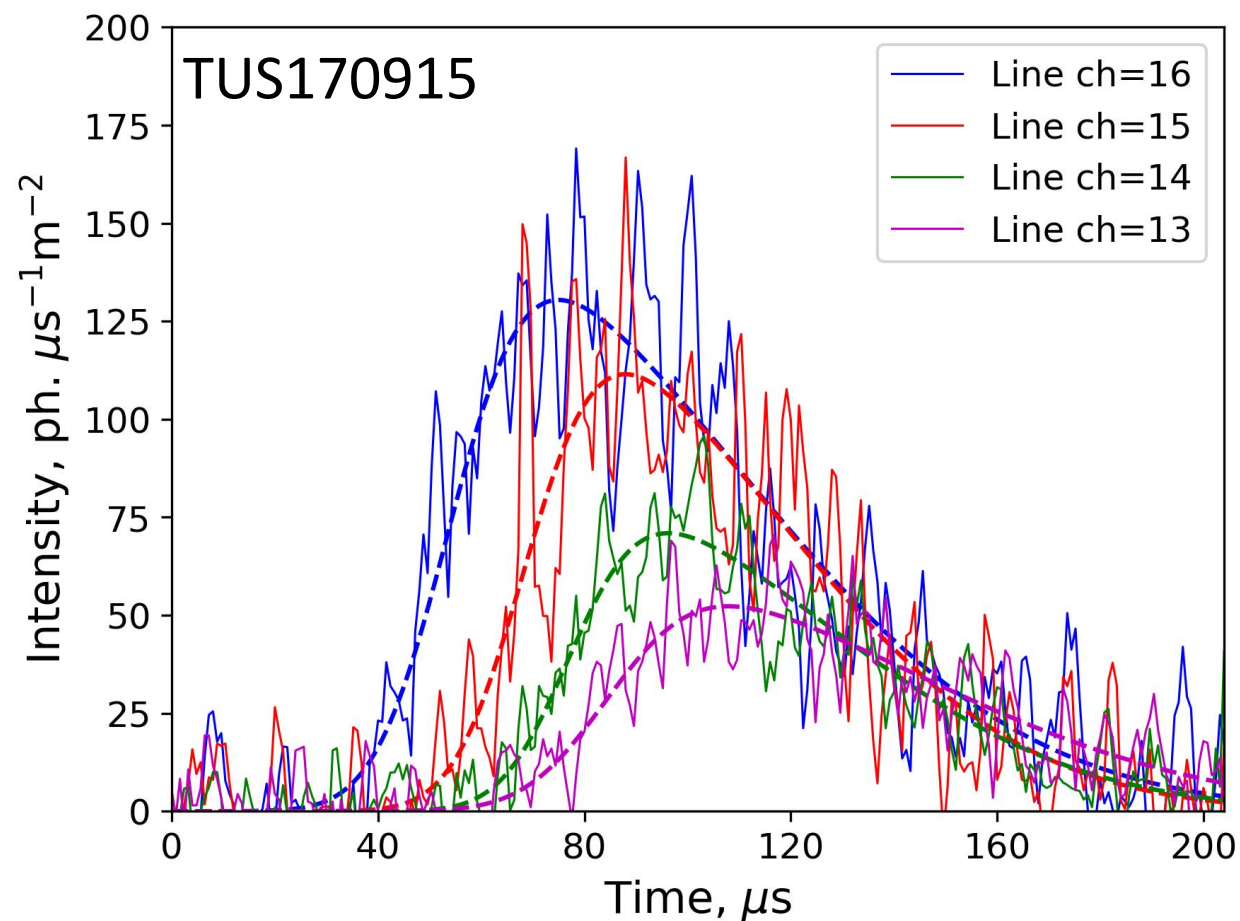
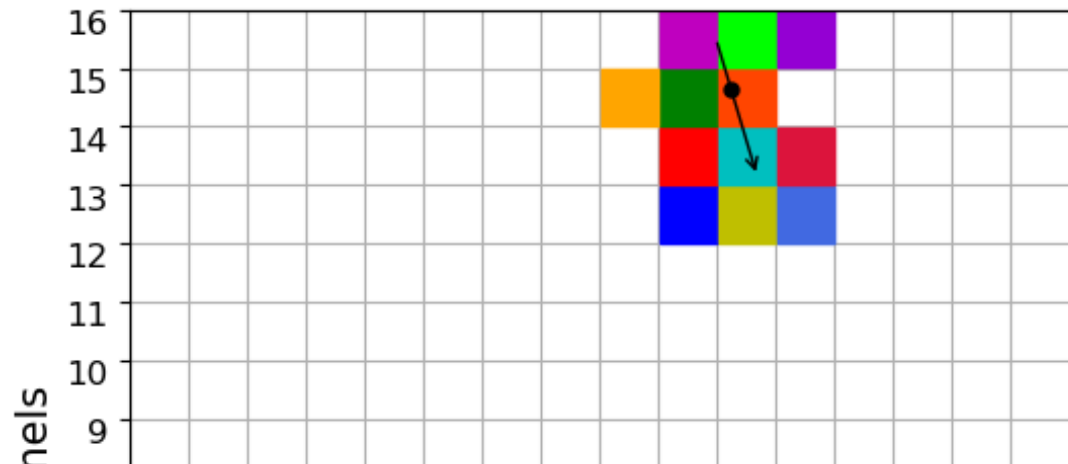
ШАЛ-подобные события

- Гауссоподобная кривая свечения.
- Характерное время свечения (0.1-0.2 мс).
- Большое кол-во «активных» пикселей (выстроенных вдоль «толстого» трека).
- Видимое движение.



Видимое движение

- Перемещение пика сигнала из пикселя в пиксель.
- Оценка видимой скорости.
- Восстановление трека.
- Результат: источник УФ-излучения движется прямолинейно с *релятивистской* скоростью.
- Постулируя $V = C$, восстанавливаем *направление прихода*.



ШАЛ-оподобные события TUS

Events	$A_{\max}$, ph. m ⁻² μ s ⁻¹	FDHM, μ s	Asymmetry	ω , rad/s	V/c	ΔL , km
TUS161003	205	49.4	1.56	210	0.34	10.0
TUS161031	121	61.8	2.18	122	0.20	7.4
TUS170915	442	72.0	1.69	173	0.28	12.1
TUS171010	452	62.8	1.82	179	0.28	10.6
TUS171029a	193	46.6	1.59	112	0.18	4.9
TUS171029b	443	63.8	1.61	81	0.13	4.9

Проблемы ШАЛ-интерпретации:

- 1) слишком большие энергии (≥ 1 ZeV) и слишком много.
- 2) (квази)вертикальные события (зенитный угол 10-30°)
- 3) большинство (все со значимым перемещением) над территорией USA.

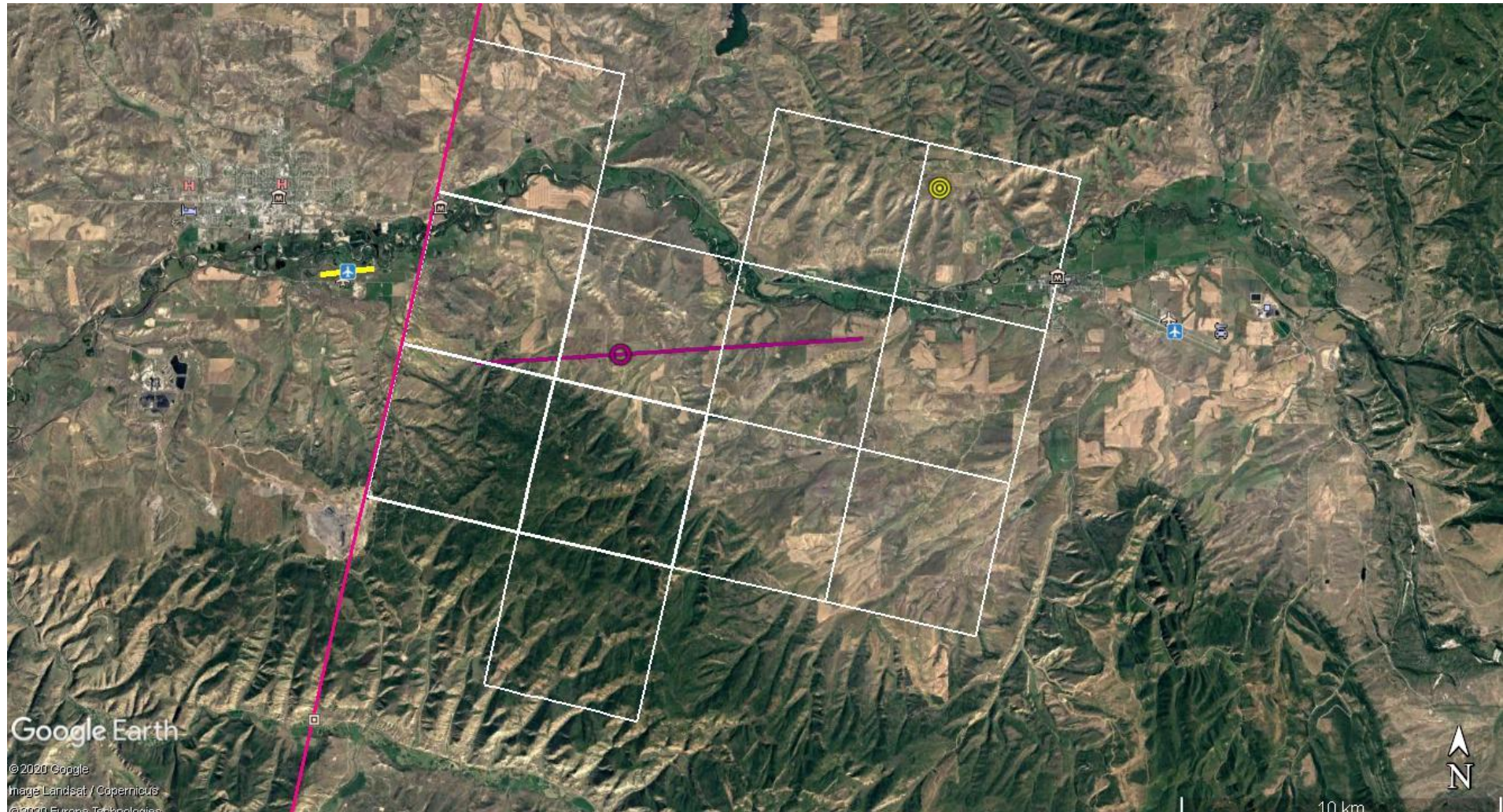


Гипотеза ВВП и VOR

- ВВП: взлетно-посадочная полоса
- VOR: VHF omnidirectional range, всенаправленный азимутальный УКВ-радиомаяк

$\Delta\phi \approx 0$, $\Delta t \approx 0$
(from airport)

TUS170915: *Craig Moffat County Airport*



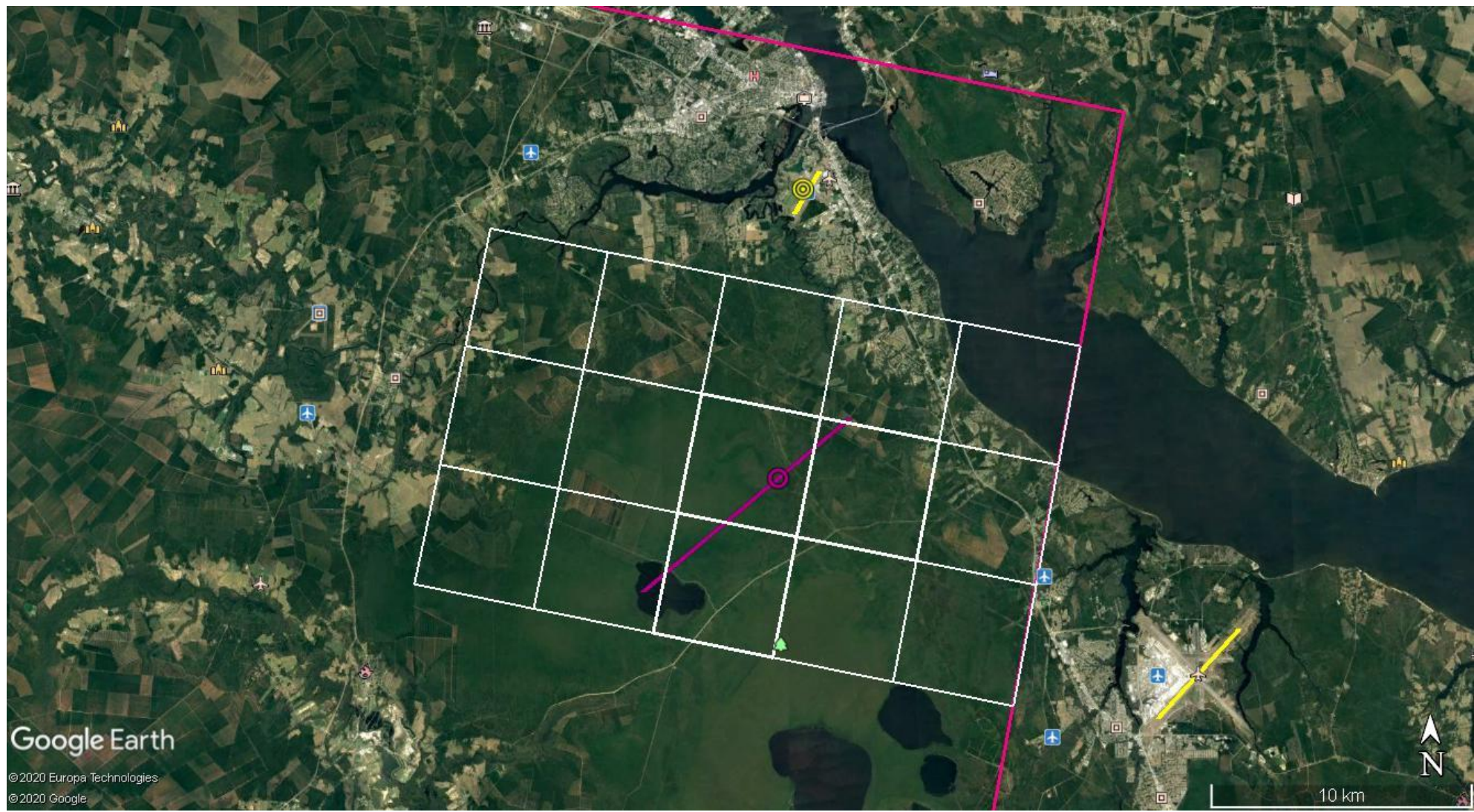
Гипотеза ВВП и VOR

TUS171010: *Cherry Point Mcas Airport*

$\Delta\phi < 5$, $\Delta t \approx +2$ s
(from airport)

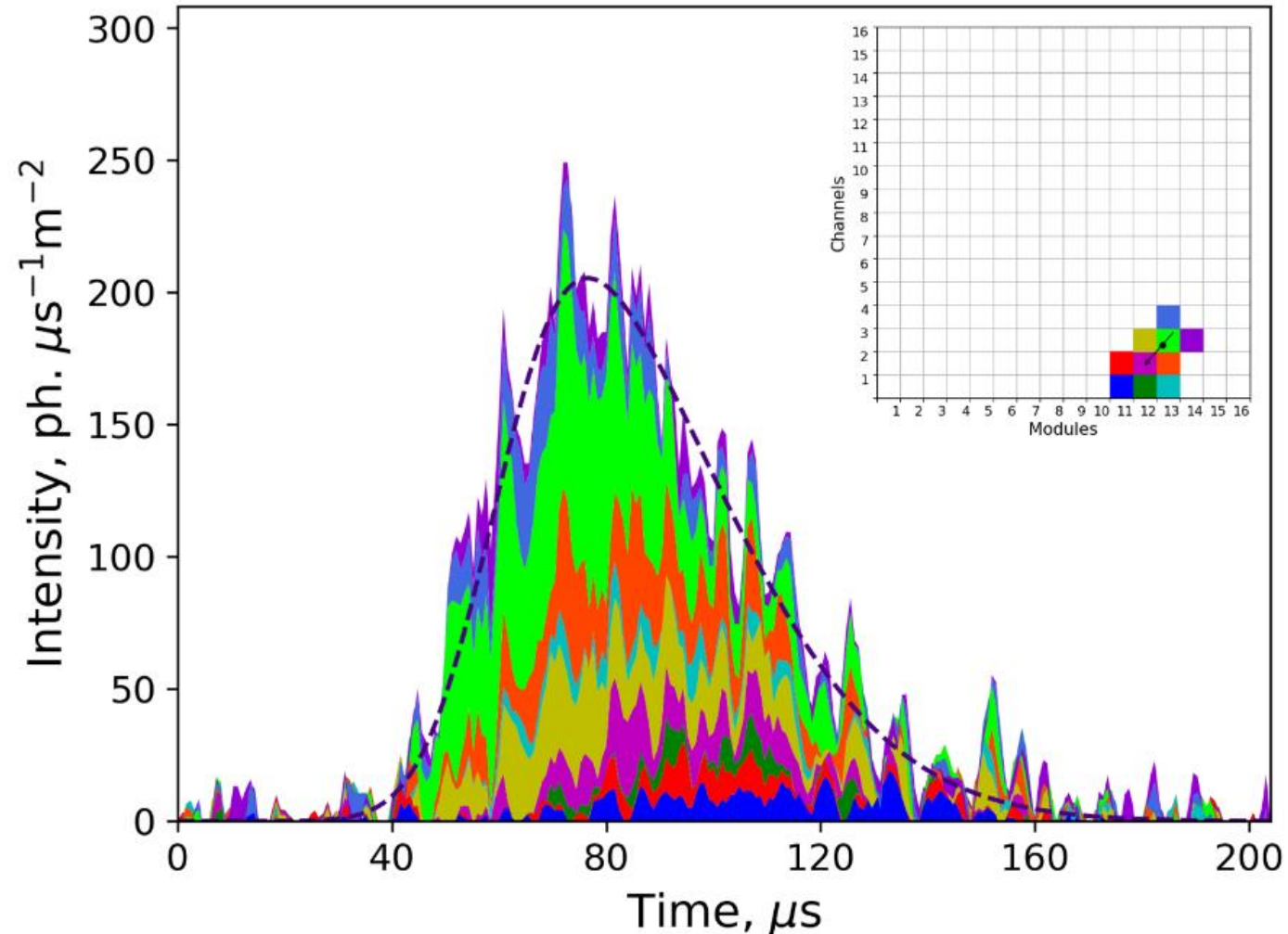
6 EAS-like events:

- 3 (TUS161031, TUS170915, TUS171010) удовлетворяют гипотезе ВВП
- 2 (TUS171029a,b) – расхождения объясняются низкой точностью реконструкции
- 1 (TUS161003) – Minnesota Event!



Событие TUS161003 (Minnesota Event)

- Параметры события:
 $E(\text{ШАЛ}) > 1 \text{ ZeV}$
 $Z_n = 20\text{-}40^\circ$, $\text{FDHM} = 50 \text{ мкс}$
 $H_{\text{max}} > 7\text{-}8 \text{ км}$
- *Варианты Интерпретации*: ШАЛ, импульс лазера, синхронизированная во времени последовательность вспышек ламп, осветительная система ВПП, бортовые фонари самолета, «подогревания» ионосферы VOR-станциями...



Релятивистские пылинки (РП) как новая компонента КЛ ПВЭ

- Предыстория вопроса: Spitzer (1949), Hayakawa (1972), Berezhinsky&Prilutsky (1973,1977), Linsley (1980), Anchordoqui (2000).
- Работа Калмыков, Хренов, Гарипов, Сычев и др. (2004) («Флуоресценция атмосферы при прохождении субрелятивистских и релятивистских пылинок, ускоренных во взрывах сверхновых, и ее регистрация оптическими детекторами»)
- Обзор Hoang, Lazarian&Schlickeiser (2014): проблема ускорения РП, проблема «выживания» РП в межгалактической, межзвездной среде и в Солнечной системе.
- Флуоресценция (возбуждение азота): выход флуоресценции $q(X)$ пропорционален ионизационным потерям dE_i/dX (для каскада на высотах 0–30 км около 5 фотонов на метр пути каждого электрона).

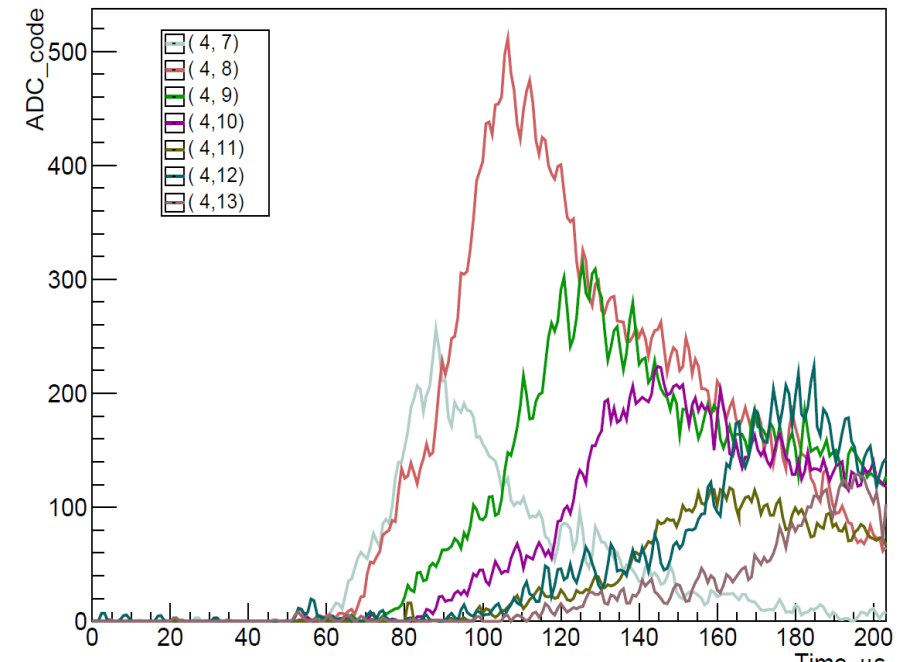
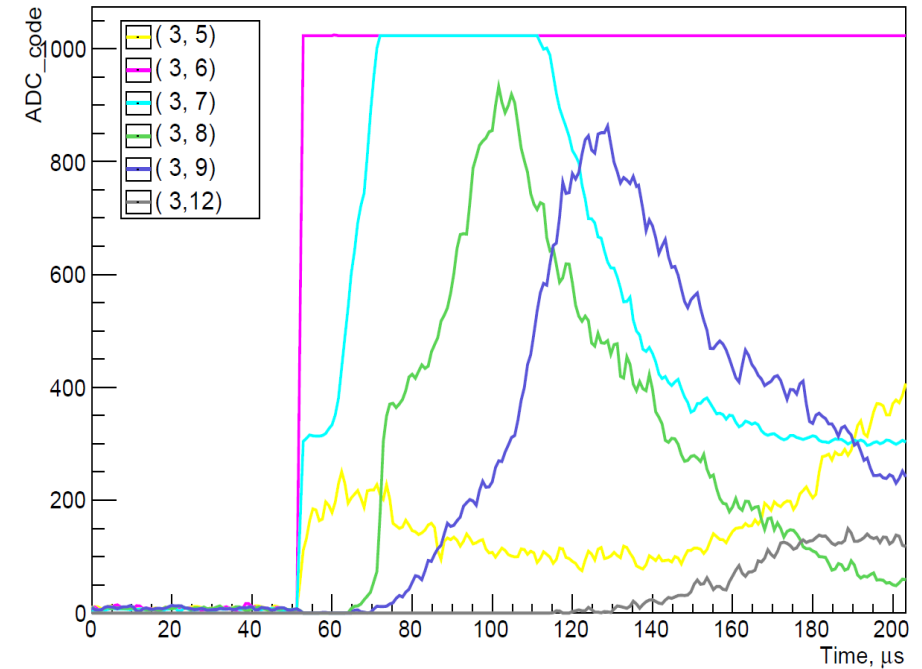
Свечение релятивистской пылинки

- Гипотеза Б.А. Хренова о трех вкладах в УФ-излучение (флуоресценция):
 - 1) от первичных ионов (пропорциональна Z^2).
 - 2) от сильно ионизирующих (относительно тяжелых, малоподвижных) фрагментов ядерного расщепления, возникающих в столкновениях РП с ядрами воздуха.
 - 3) от ионизации релятивистскими каскадными электронами ШАЛ, инициированных составляющими ядрами налетающей РП.
- *ВАЖНО*: наличие трех компонент флуоресценции приводит к тому, что в зависимости от параметров РП регистрируемые с орбиты события могут иметь разную (и довольно сложную!) пространственно-временную структуру сигнала.
- Б.А. Хренов сделал оценки для сценариев с $E_0 = 100$ ЭэВ, $N_n = 10^9$ - 10^{10} ($\gamma \sim 10$).

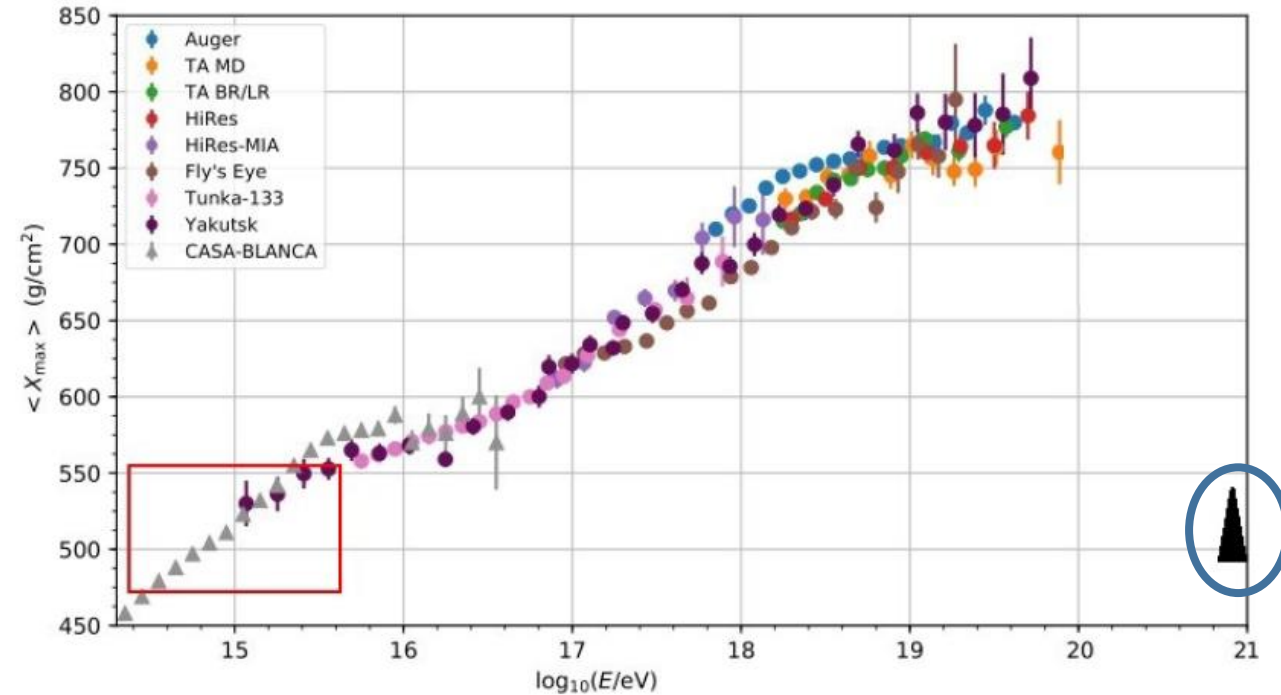
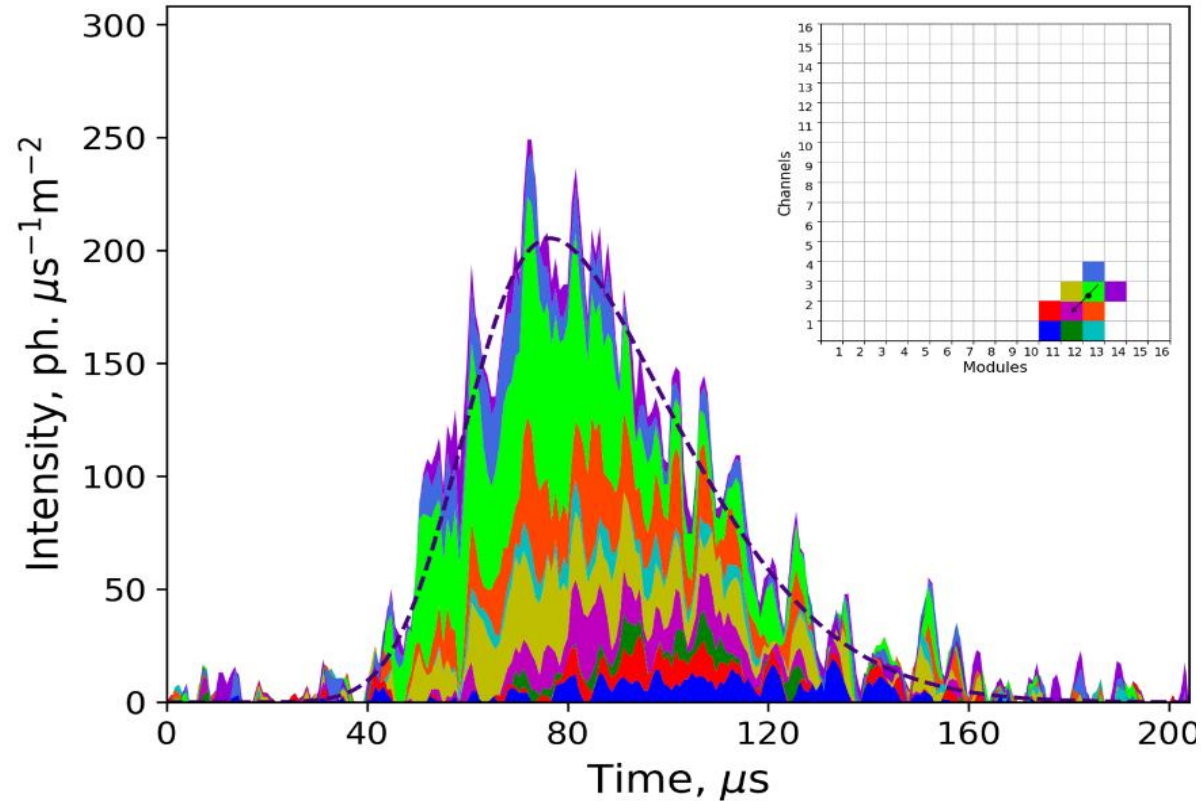
Экзотическое событие TUS170426

- Первая составляющая сигнала – в пикселе (3,6) – итог стадии расщепления ядер. Эффект насыщения приводит к «методическому» уширению сигнала (большие токи в ФЭУ).
- Вторая составляющая – стадия развития ШАЛ – соответствует источнику, движущемуся (квази)горизонтально со скоростью света (и оценкой энергии 500-1000 ЭэВ).

170426_151956_3rd Module



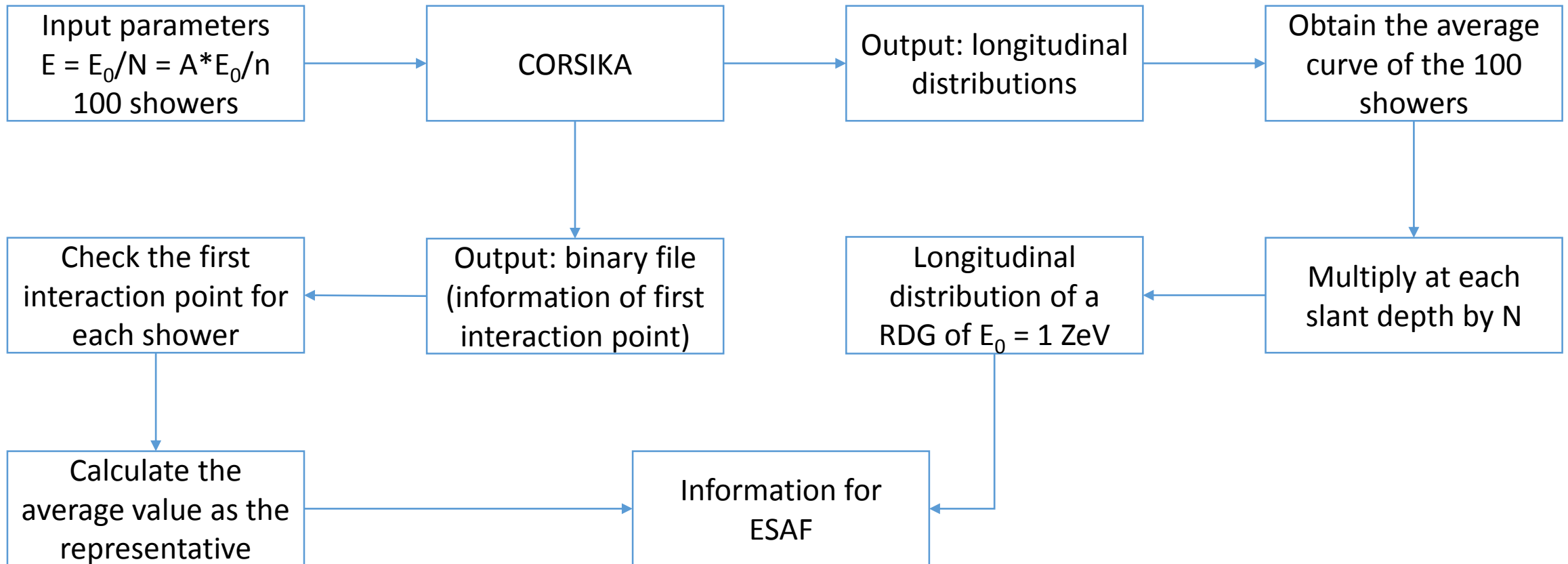
Моделирование РП в CORSIKA+ESAF



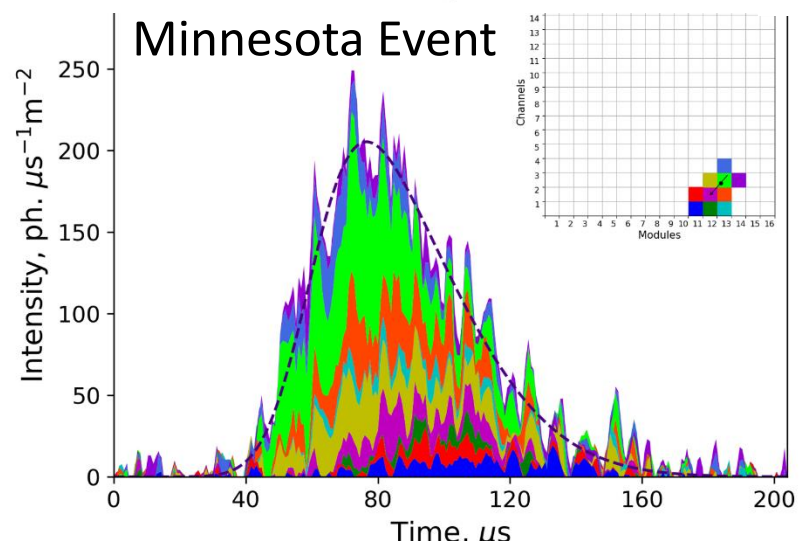
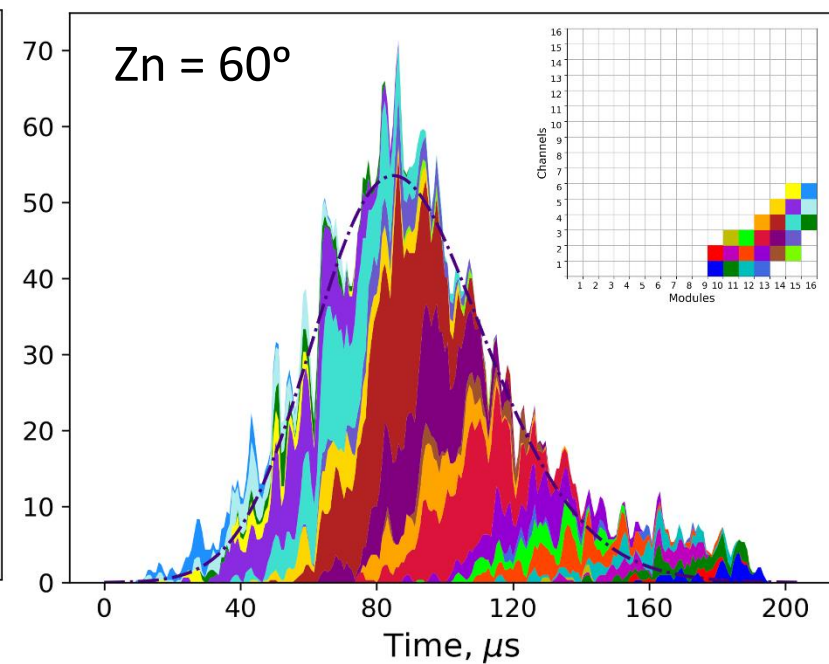
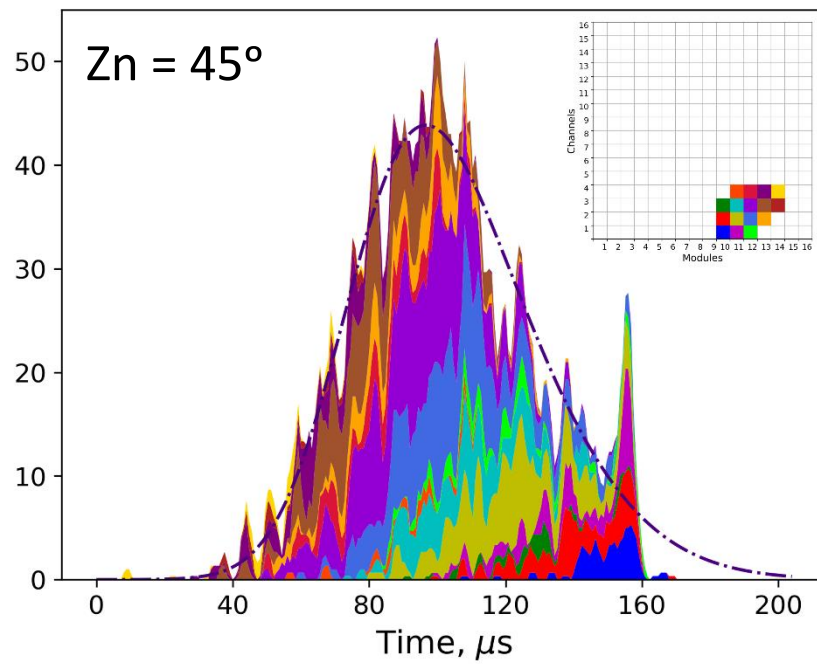
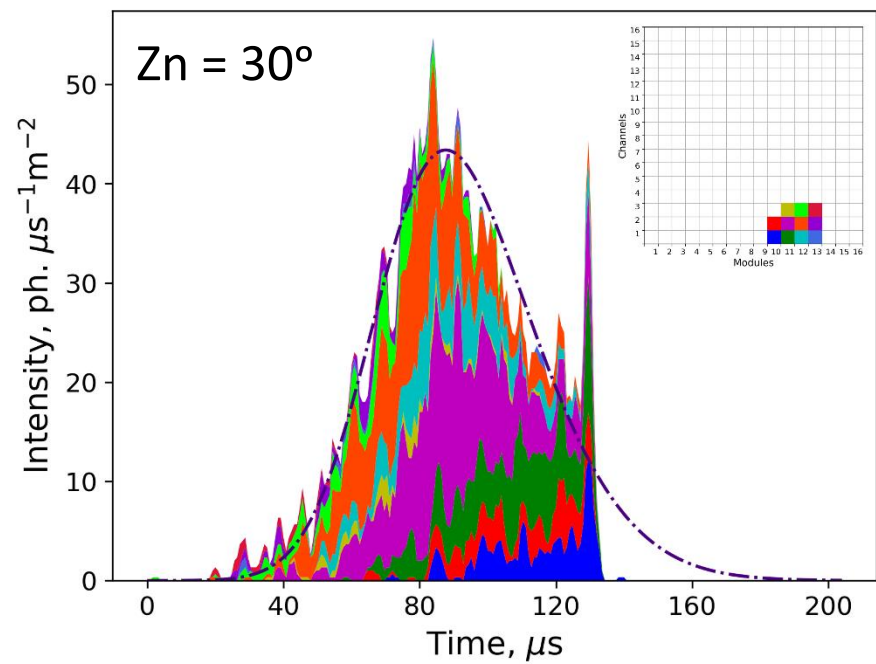
- Оценки высоты и глубины максимума для: $H_{\text{max}} > 7\text{-}8 \text{ км}$, $X_{\text{max}} < 550 \text{ г/см}^2$

$\Rightarrow E_0 = 1 \text{ ZeV}$, $N_n = 10^6$, $E_n = E_0/N_n = 1 \text{ PeV}$ ($\gamma \sim 10^6$)

Flow Diagram for simulate a RDG of $n = 10^6$ nucleons and $E_0 = 1$ ZeV



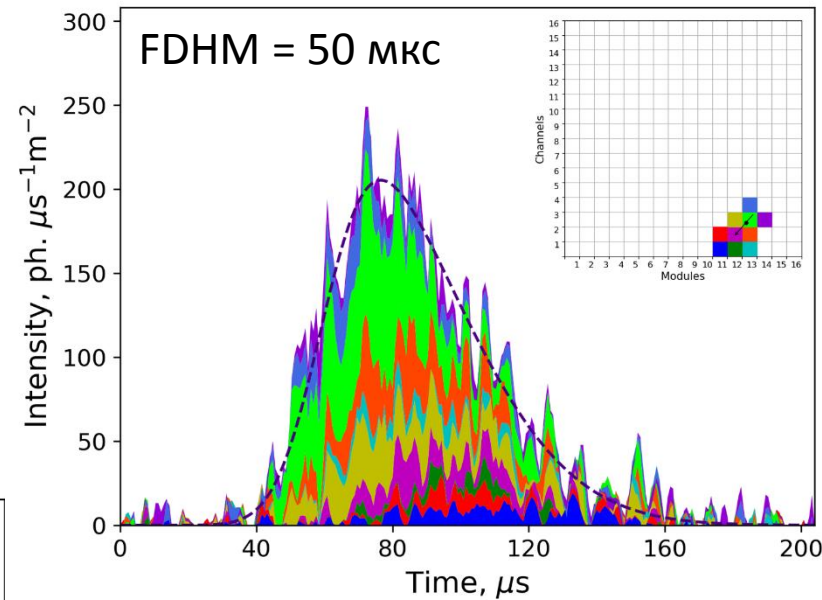
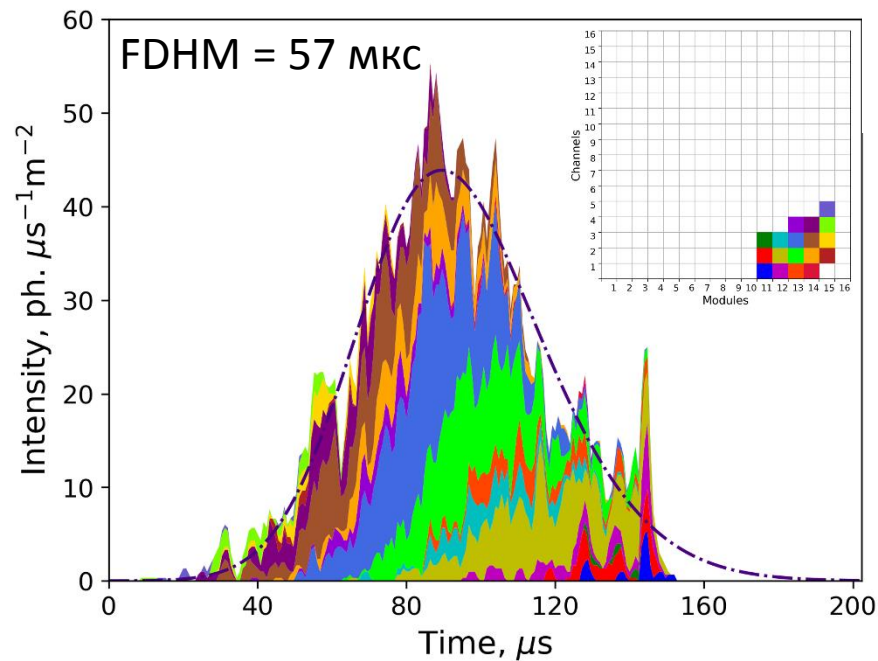
Кривая свечения железной пылинки



$$X_{\max} = 570 \text{ г/см}^2$$
$$H_{\max} = 6, 7, 10 \text{ км}$$

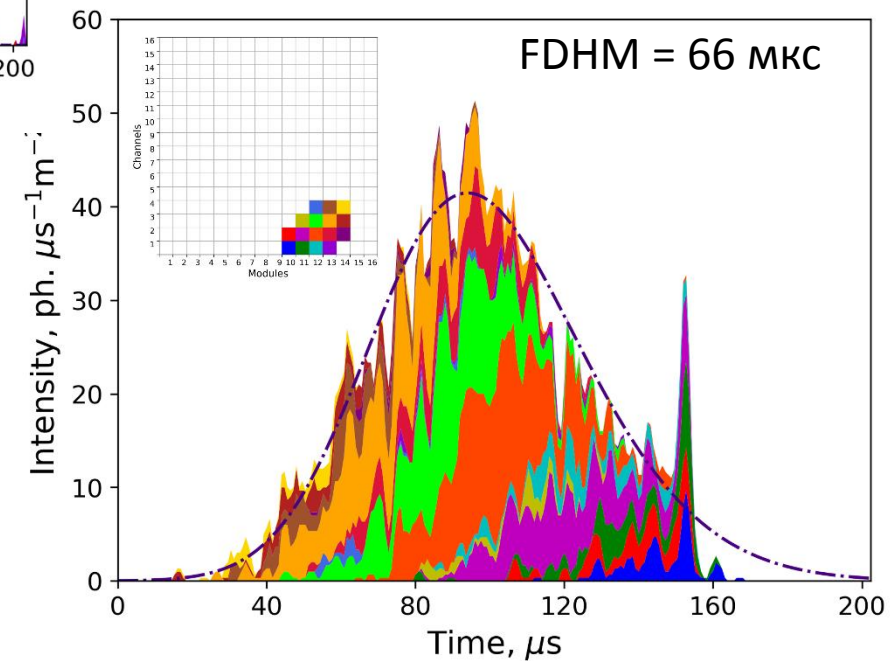
Кривая свечения: $Z_n = 45^\circ$

Протон

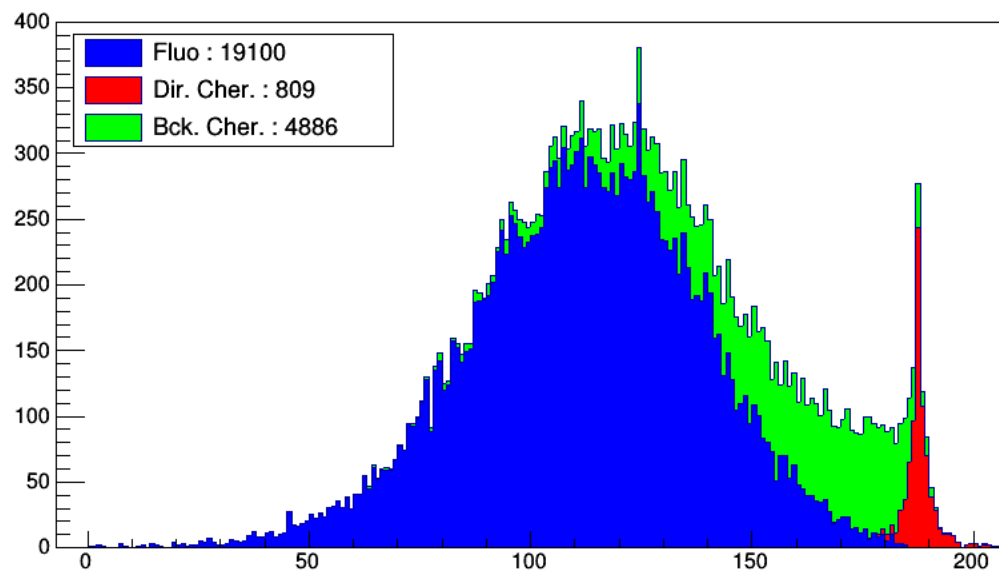


Minnesota Event

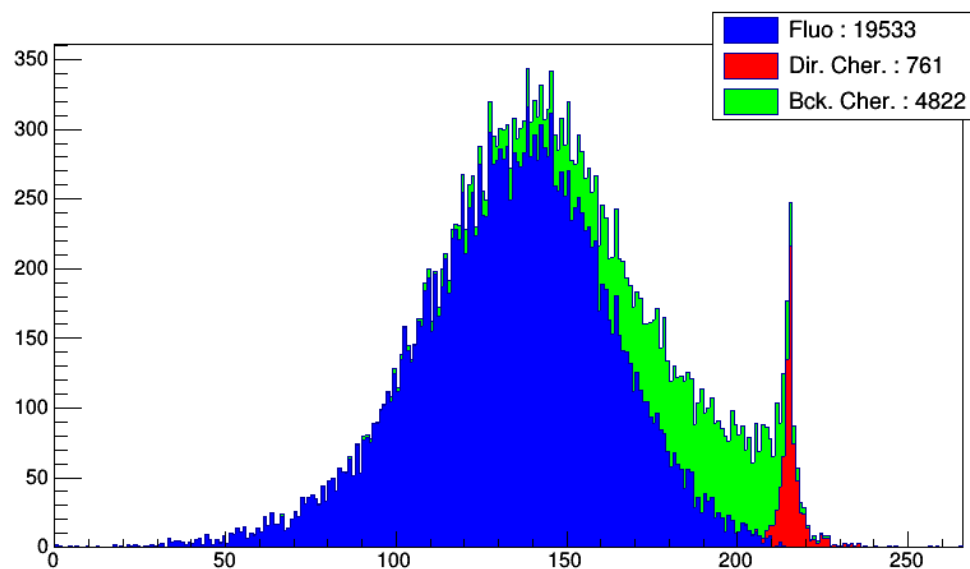
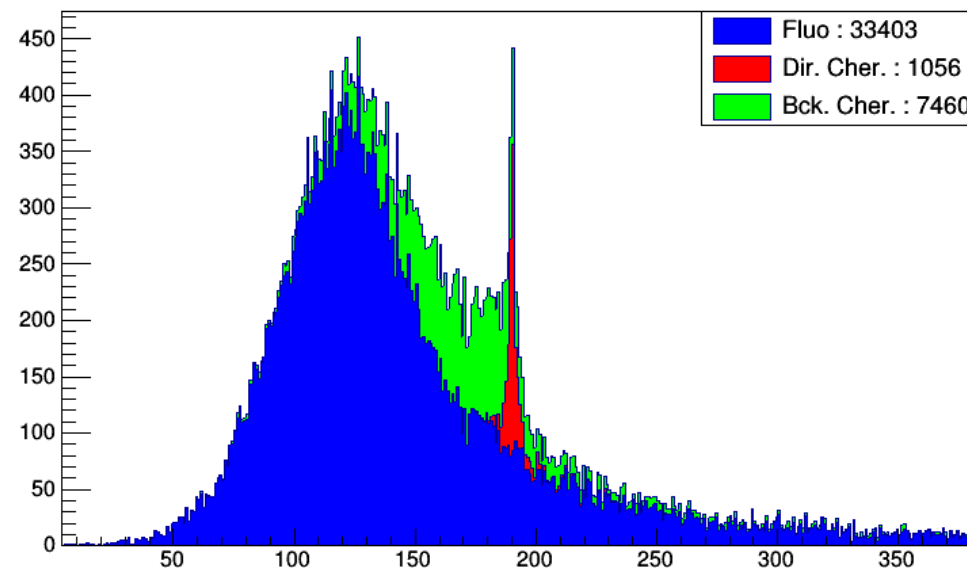
Железо



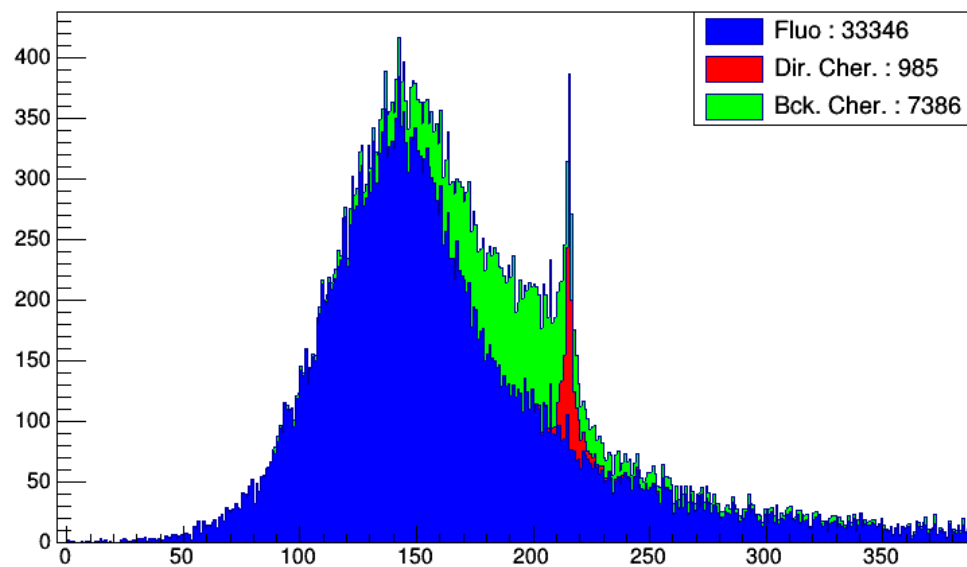
Многократное рассеяние



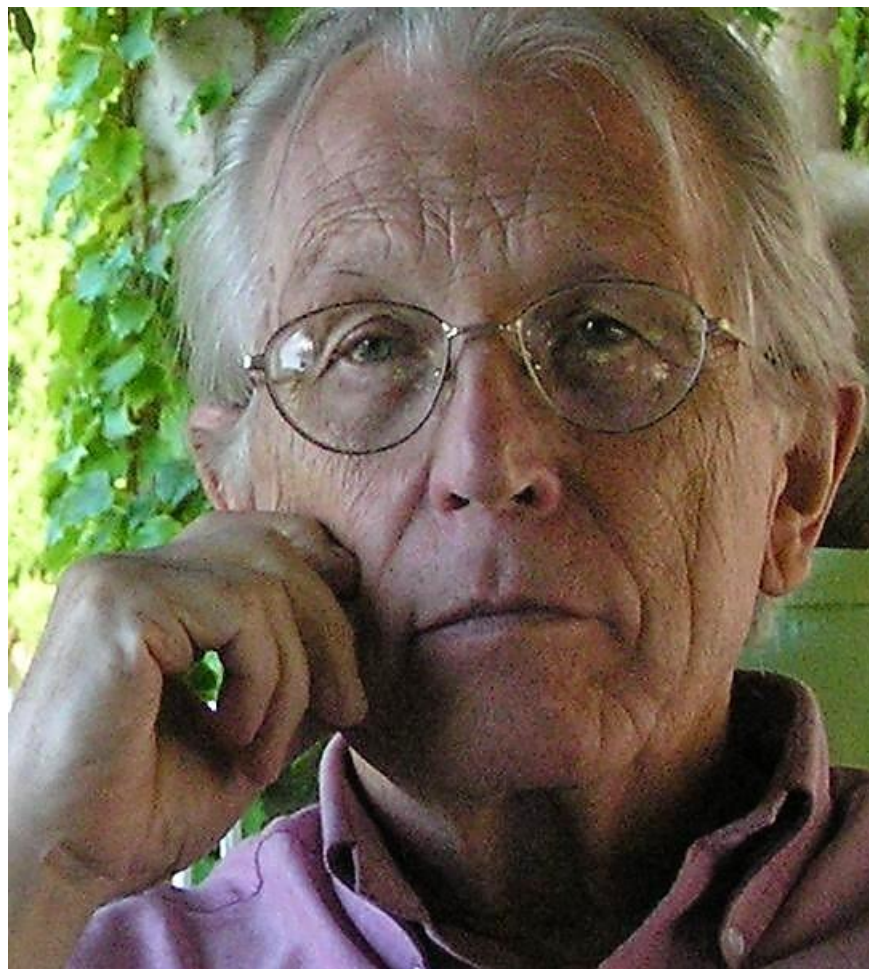
Протон



Железо



30 июня – День Рождения Б.А. Хренова



Back UP

Оценки вкладов

РП	$dE_i/dX,$ $\text{ГэВ}/(\text{г}/\text{см}^2)$	$\sigma,$ 10^{-24} см^2	$\Delta,$ $\text{г}/\text{см}^2$	$E_i,$ ГэВ	$Q_{\text{max}},$ 10^{15} фот.
Si	0,4	1,66	54	21,6	2,6
Fe	1,56	4,3	14	22,4	2,7

$E_0 = 100 \text{ ЭэВ}, N_n = 10^{10} (\gamma \sim 10)$

N_n	10^{10}	10^9	56 (Fe)	1 (H)
$E_n, \text{ GeV}$	10	100	$1,8 \cdot 10^9$	10^{11}
$X_{\text{макс}}, \text{ г}/\text{см}^2$	290	360	750	830
$H_{\text{макс}}, \text{ км}$	9,5	7,8	3,2	1,5
$Q_{\text{расщ}}$	$20 \cdot 10^{15}$	$1,9 \cdot 10^{15}$	-	-
$Q_{\text{каскад}}$	$1,5 \cdot 10^{15}$	$1,7 \cdot 10^{15}$	$1,8 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{15}$

