Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes

Teleskop FAST

rekonstrukce událostí

Petr Hamal

Úvod

FAST telescopes at TA, Utah, USA

Telescope Array in Delta, Utah, USA

FAST telescopes at Los Leones, PAO, Malargüe, Argentina

FAST teleskopy - TA a PAO

FAST @ TA

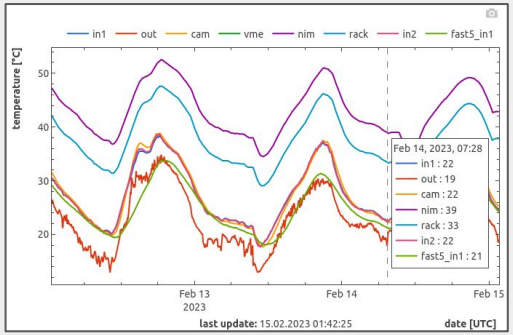
- 3 teleskopy v provozu
- externí trigger
- bez GPS informace (pouze NTP server a informace o odchylce mezi DAQ a NTP)
- YAP zdroje signálu fixně na některých PMT
- data od 2016 do 2019
  - COVID-19 pauza
  - od listopadu 2022 připraven k provozu
  - zatím bude operován kolegy z Japonska
  - česká skupina provádí UV LED měření k potenciální kalibraci kamery
- přenos dat omezen kvůli horší konektivitě
  - nutno zkopírovat na externí disk, přenést mimo TA síť, pak možno kopírovat do Olomouce, proto delší čekací doba na naměřená data

FAST @ PAO

- 1 teleskop v provozu
- <u>období duben 2019 - prosinec 2020</u>:
  - interní trigger, GPS signál
  - YAP kalibrace 2x (duben a 2019)
  - UV LED měření možná (využití ke kalibraci?)
  - mimo provoz 2021 - červen 2022 (COVID-19, DAQ)
- <u>období červen 2022 - současnost</u> (únor 2023)
  - externí trigger, ztráta signálu GPS (listopad 2022; od leden 2023 přechod na podobný stav jak pro TA)
  - UV LED kalibrace během měření
  - YAP kalibrace 1x (červen 2022)
- DAQ - postupné problémy se startem
  - pokus o opravu, funguje, ale nesmí se vypnout

Nabírání dat

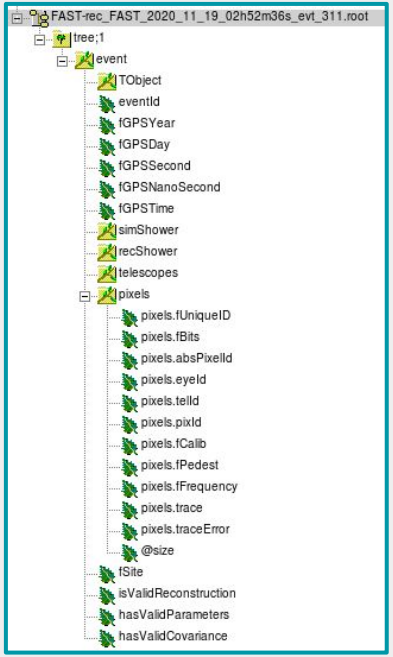
- DAQ systémy na FAST@TA i FAST@PAO
- logování průběhu nočního měření - ELOG systém (https://elog.psi.ch/elog/)
  - prvně použit pro FAST@PAO - tato měření jsou v gesci olomoucké skupiny
  - od listopadu 2022 instalováno i pro FAST@TA
- sběr dat z environmentálních čidel
  - data ukládána do DB

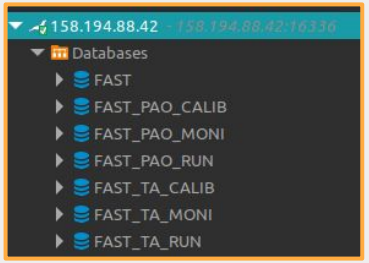


ID	Date	Shifter	Type	Shift start date (ART)	Text
Draft	Wed Feb 15 00:21:57 2023	Petr Hamal	Shift	2023-02-14	00:23 NIM, SQM ON 00:25 HV ON
18	Fri Feb 10 06:37:29 2023	Michal Koutny	Calibration	2023-02-10	Fri Feb 10 06:37:18 2023 NIM, SQM on Fri Feb 10 06:39:24 2023 HV on Fri Feb 10 07:19:37 2023 Pedestal
17	Mon Feb 6 06:46:14 2023	Michal Koutny	Calibration	2023-02-06	Mon Feb 6 06:46:02 2023 NIM, SQM on Mon Feb 6 06:49:00 2023 HV on Mon Feb 6 07:25:14 2023 Pedestal
16	Mon Jan 30 03:01:26 2023	Vlastimil Jílek	Shift	2023-01-29	02:57 NIM, SQM ON 02:58 HV ON 03:00 FailSafe -endtime 08 30
15	Sun Jan 29 02:21:02 2023	Vlastimil Jílek	Shift	2023-01-28	02:15 NIM, SQM ON 02:18 HV ON 02:20 FailSafe -endtime 08 30
13	Sat Jan 28 01:09:11 2023	Martin Vacula	Shift	2023-01-27	01:30 NIM, SQM ON 01:33 HV ON 01:33 FailSafe -endtime 08 30
12	Fri Jan 27 00:28:44 2023	Vlastimil Jílek	Shift	2023-01-26	00:26 NIM, SQM ON 00:28 HV ON 00:30 FailSafe -endtime 08 30
11	Thu Jan 26 00:37:06 2023	Vlastimil Jílek	Shift	2023-01-25	00:24 NIM, SQM ON 00:26 HV ON 00:28 FailSafe -endtime 08 30
10	Wed Jan 25 00:32:00 2023	Martin Vacula	Shift	2023-01-24	00:35 NIM, SQM ON 00:37 HV ON 00:38 FailSafe -endtime 08 30
9	Tue Jan 24 00:56:17 2023	Martin Vacula	Shift	2023-01-23	00:52 NIM, SQM ON 00:57 HV ON 00:57 FailSafe -endtime 08 30
7	Mon Jan 23 00:50:27 2023	Martin Vacula	Shift	2023-01-22	00:54 NIM, SQM ON 00:58 HV ON 00:59 FailSafe -endtime 08 30
6	Sun Jan 22 00:01:53 2023	Fraser Bradfield	Shift	21/01/2023	00:11 NIM, SQM ON 00:51 HV ON 00:55 FailSafe -endtime 08 30
5	Sat Jan 21 00:53:57 2023	Petr Hamal	Shift	2023-01-20	00:54 NIM, SQM ON 00:59 HV ON FailSafe -endtime 08 30
4	Fri Jan 20 01:05:16 2023	Dusan Mandat, Michal Koutny	Shift	2023-01-19	Fri Jan 20 01:05:21 2023 NIM, SM ON Fri Jan 20 01:08:45 2023 HV ON Fri Jan 20 01:38:44 2023 Calibration
		Dusan Mandat			Thu Jan 19 01:12:29 2023 NIM, SQM ON

Datové úložiště

- data z měření jsou mimo jiné zálohována i na server do Olomouce
- zatím jsou uložena v originálním formátu
  - horší práce s daty při jejich zpracování a analýze
  - v brzké době budou převedena do ROOT formátu (https://root.cern/), zlepší to správu práce s daty
    - **konverze RAW->ROOT** je součástí FASTFramework (bude popsáno pozdeji)
- FAST databáze pro různá data
  - informace ze senzorů, kalibrací (HV, YAP, UV LED)
- výpočetní výkon - dedikovaný počítač
  - alias: ZUBR





Zpracování dat - absolutní kalibrace

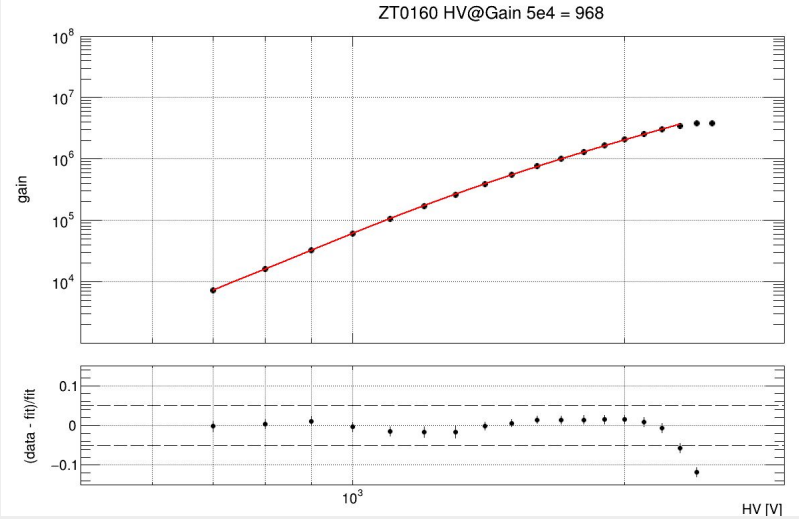
- **měření závislosti zesílení** (Gain) fotonásobiče (PMT) **na napětí** (HV) provedena skupinou z Chicago University
  - body proloženy polynomemem 3. řádu
  - hodnoty vstupují do výpočtu kalibrační konstanty pro přepočet počtu PMT signálu na fotoelektrony ($N_{p.e.}$)
  - kalibrační hodnoty uloženy do DB
- **HV hodnoty PMTs laděny na stejný zisk** (5e4)
  - u některých PMTs bylo HV dodatečně upraveno, proto nutnost znát nové kalibrační konstanty

FAST@TA

timestamp	chanid	value
1 475 466 439	4	8,3
1 475 466 439	5	8,262
1 475 466 439	6	8,223
1 475 466 439	7	8,328
1 506 406 530	0	6,443
1 506 406 530	1	8,026
1 506 406 530	2	7,965
1 506 406 530	3	6,174
1 538 809 169	8	11,451
1 538 809 169	9	8,05
1 538 809 169	10	7,832
1 538 809 169	11	7,962

FAST@PAO

timestamp	chanid	value
1 555 027 013	0	7,909
1 555 027 013	1	8,122
1 555 027 013	2	8,212
1 555 027 013	3	8,018
1 555 407 312	0	5,728
1 555 407 312	2	4,427
1 555 407 312	3	21,815

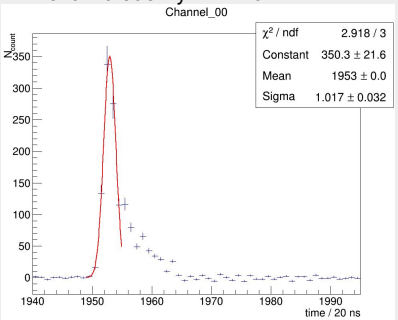


Zpracování dat - relativní kalibrace - YAP zdroj

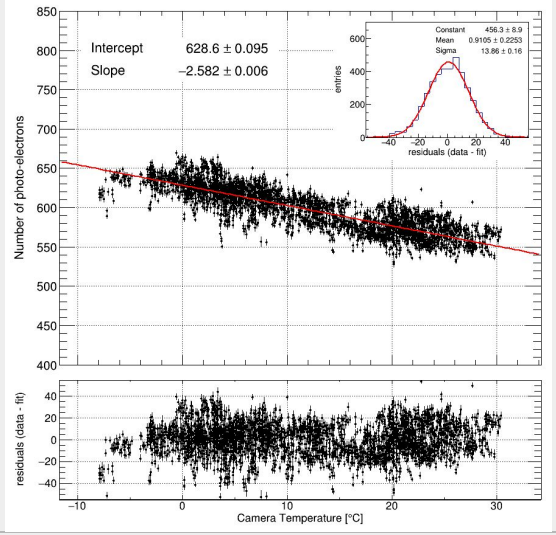
- $YAlO_3$:Ce (**Y**ttrium **A**luminum **P**erovskite) scintilátor excitovaný α-^{241}Am, 50 Bq
- YAP kalibrace pro **FAST@PAO**

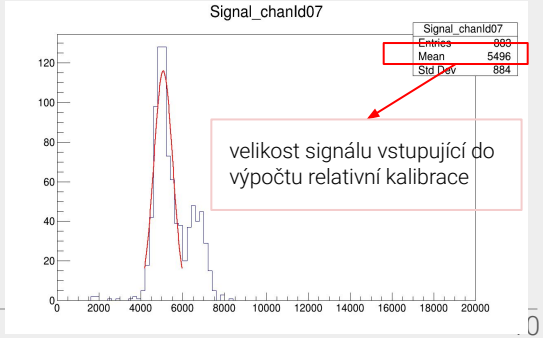
date / PMT	0	1	2	3
12.04.2019	1.441	1.000	1.498	0.580
12.11.2019	1.791	1.000	2.144	0.432
21.06.2022	1.530	1.000	2.187	0.448

ukázka odezvy PMT na YAP



- teplotní kalibrace: fixní YAP
  - cca -0,4% Np.e. na +1°C

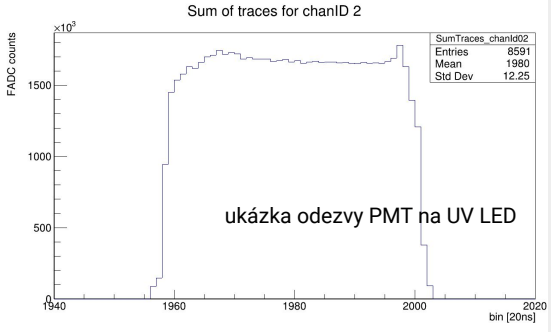




Zpracování dat - UV LED zdroj

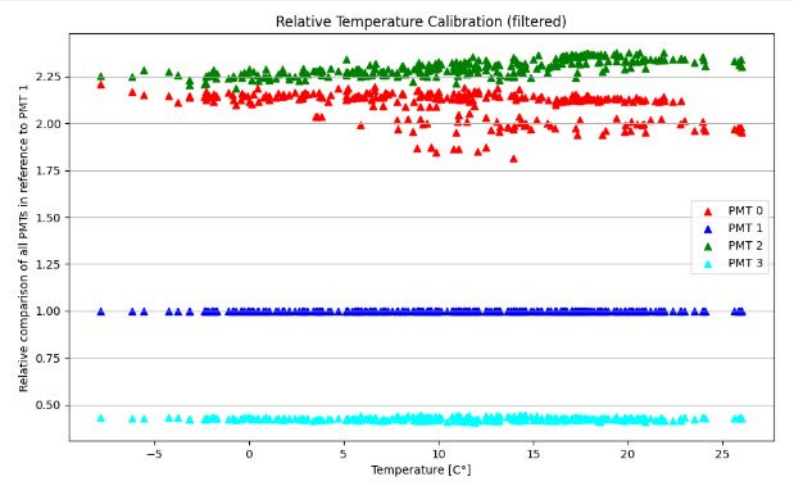
Michal Koutný

- cílem je využití UV LED zdroje k relativní kalibraci velikosti signálu, případně k teplotní kalibraci signálu



- UV LED signál detekovaný PMT

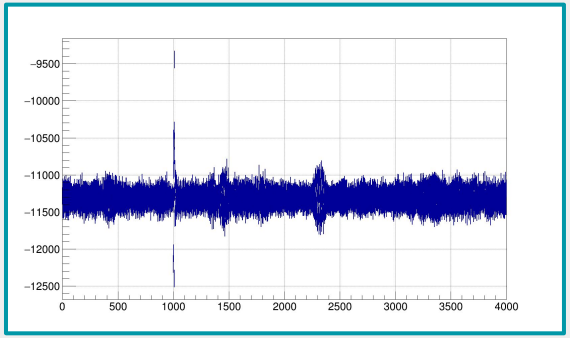
- porovnání závislosti relativních hodnot UV LED signálu na teplotě
- použita data z období do konce roky 2020

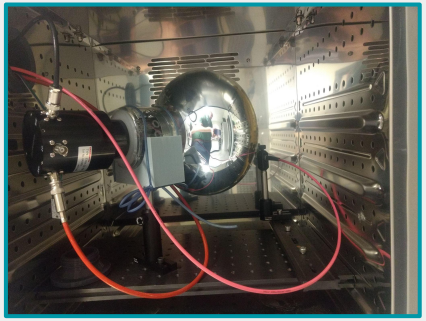


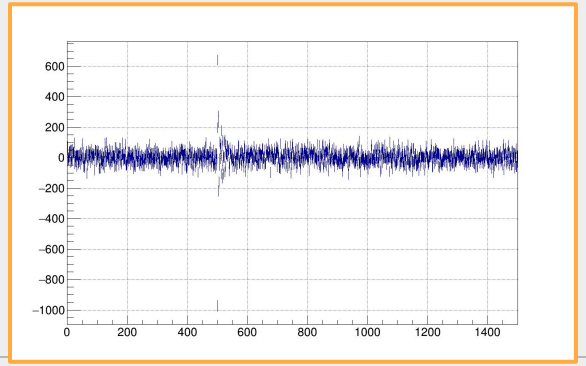
Zpracování dat - kalibrace fotonásobičů

Vlastimil Jílek

- cílem je stanovení teplotní závislosti zisku fotonásobiče pro různá napětí
- probíhá v zatemněné klimatické komoře
- 1. sestava:
  - LED dioda, pokojová teplota, U_{PMT} = 720V
  - nedostatečně jemné nastavení intenzity světla
- 2. sestava:
  - pulzní laser (místo LED)
- měření vykazovalo vysoký šum
  - instalace plechové bedny



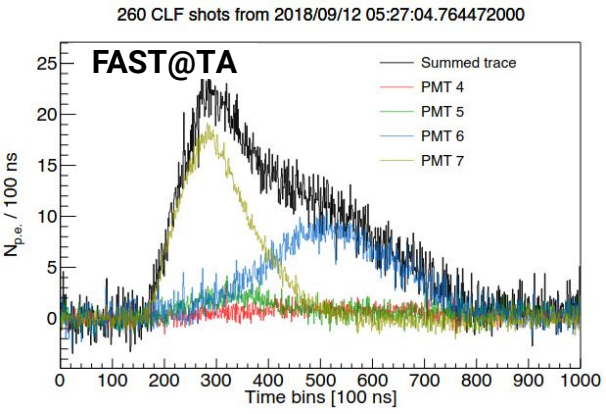


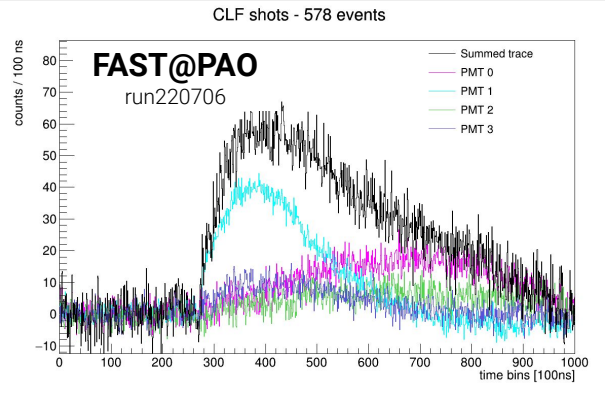


Zpracování dat - potenciální CLF analýza

Vlastimil Jílek

- studium proveditelnosti následujících bodů analýzy
  - možnost (limity) detekce CLF signálu detektorem FAST
  - využití detekovaného CLF signálu k vlastní studii propustnosti atmosféry v místě detekce (stanovení množství aerosolů v atmosféře)
- zdroj CLF vzdálen ~26 km od detektoru FAST
  - pravděpodobně mimo detekovatelnou oblast
  - CLF mělo problémy s intenzitou světelného zdroje
- detekovatelnost jedné CLF události
  - jen díky rozptylu světla od oblačnosti
  - **interní trigger**: aktuálně nemožná detekce CLF
  - **externí trigger**:
    - součet CLF událostí vykazuje očekávaný průběh signálu
    - nutnost funkční GPS





Zpracování dat - kategorizace signálu - I

Jakub Kmec

- cílem je vyhledat signál vhodný pro fyzikální analýzu
- analýze pomůže porozumět různým druhům signálu a jejich zdrojům
- dává nahlédnout rozdílům v nabírání dat
  - interní trigrování - vlastní výběr událostí
  - externí trigrování - používá se trigrovací signál z LosLeones bay 4
- hodnoty ukazují významný posun statistiky událostí mezi kategoriemi pro různé způsoby trigrování

category	0	1	2	3A	3B	4	5	6	7	8
internal trigger [%]	3.00	82.76	0.15	0.17	0.26	0.51	12.35	0.70	0.08	3.59E-03
external trigger [%]	78.03	20.78	0.06	0.39	0.03	0.44	0.26	0.0016	0.0005	0

šum

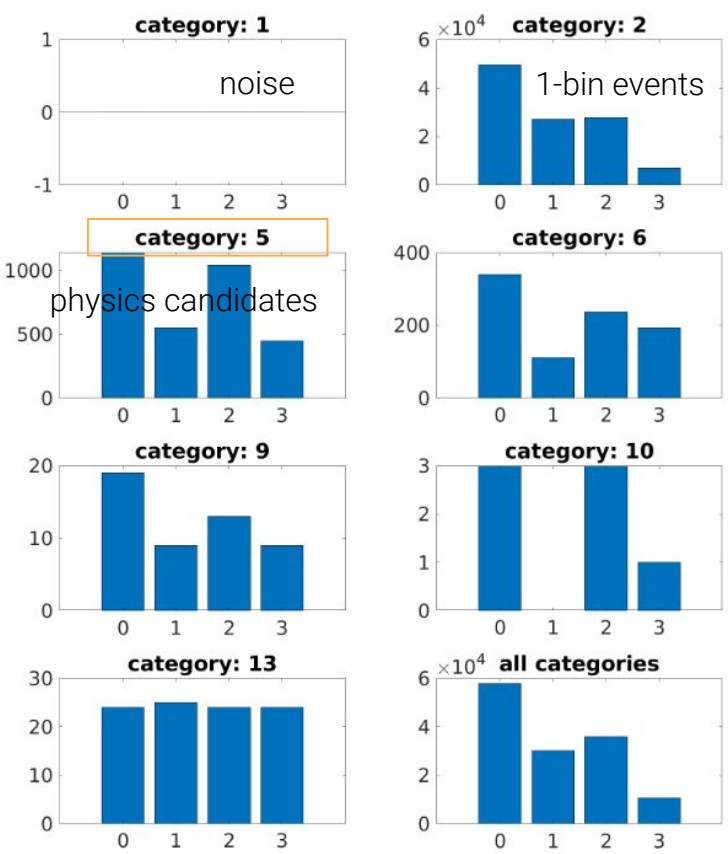
jednobinové události

fyzikální kandidáti

oscilace nebo více signální události

Zpracování dat - kategorizace signálu - II

Jakub Kmec



- **podle četnosti** zásahu jednotlivých **PMTs** se usuzuje, že **kategorie 3, 4, 5, 7 a 8** mohou **obsahovat** fyzikálně zajímavý **signál**

data z externího triggeru

Rekonstrukční proces

FAST Framework

- autoři: Justin Albury, John Farmer
- **soubor nástrojů ke zpracování dat a simulacím**
  - FAST-sim, FAST-rec, FASTTopDownRec, FASTEventIO, AirFly2FASTEventFile …
  - implementace rekonstrukční metody TopDownRec; **série simulací a porovnání se vstupními daty**; maximalizace věrohodnosti dat se simulací metodou likelihood
- **založen na Auger Offline sadě nástrojů, ROOT5**
  - implementuje starou verzi Auger Offline, kterou prakticky lze instalovat už jen v CentOS 7 (rok 2014+)
  - nutnost aktualizace a zobecnění částí kódu (psán pro FAST@TA)
- **FAST Collaboration github repozitář** (správce L. Chytka): https://github.com/FASTCollaboration
  - neveřejný, ale pod aktivní správou a neomezeném počtu členů kolaborace

Rekonstrukce

- proces založen na tzv. Top-Down Likelihood rekonstrukci
- **data** jsou **porovnávána se** sadou **simulací**, je hledána nejlepší shoda
- funkce likelihood - obecně

$$\mathcal{L}(\vec{x}\,|\vec{a}\,) = \prod_i^N P(x_i|\vec{a}\,) \longrightarrow \ln \mathcal{L}(\vec{x}\,|\vec{a}\,) = \sum_i^N P(x_i|\vec{a}\,)$$

- funkce likelihood - pro FAST rekonstrukci
  (pro jeden fotonásobič)

data

model/simulace

$$-2\ln \mathcal{L}(\vec{x}\,|\vec{a}\,) = \sum_i^N \frac{(x_i - \mu_i)^2}{[\sigma^2 + \mu_i\,(1+V_g)]} + \ln\left[\sigma^2 + \mu_i\,(1+V_g)\right] + \ln 2\pi$$

pozadí v datech

model/simulace: odhad chyby

- pro zjednodušené použití : -2ln *L*

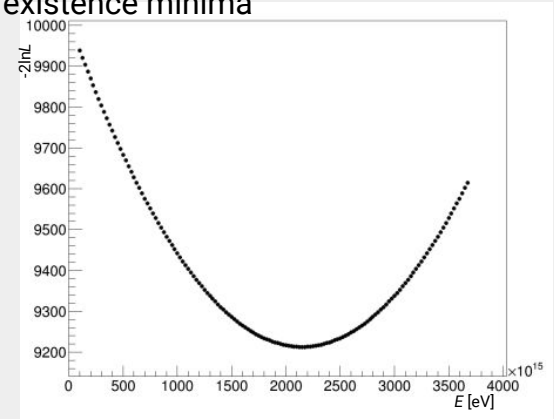
Likelihood funkce pro ideální stav

- provedena sada simulací pro E a X_{max}
  - E v rozsahu **od 0,4 do 3,5 EeV** ; X_{max} v rozsahu **od 350 do 1250 g/cm^2**
  - jako data použita událost o E = 2,1 EeV a X_{max} = 610 g/cm^2
  - použita funkce likelihood ze simulačního software
  - zkoumána její funkčnost (mimo rekonstrukční software)
  - pro ideální případ by funkce L měla být funkční

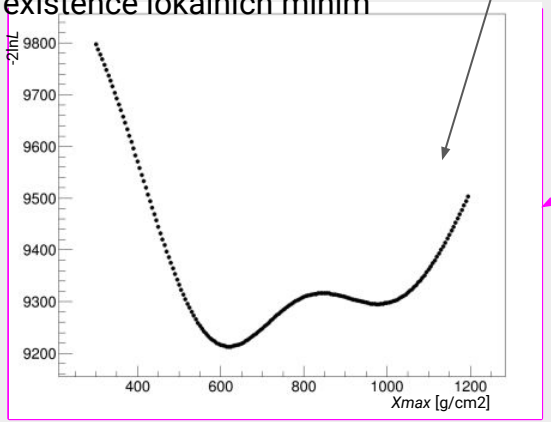
fixní parametry
zenith = 12,75 deg
azimuth = 16,05 deg
core X = -16,85 km
core Y = -24,45 km

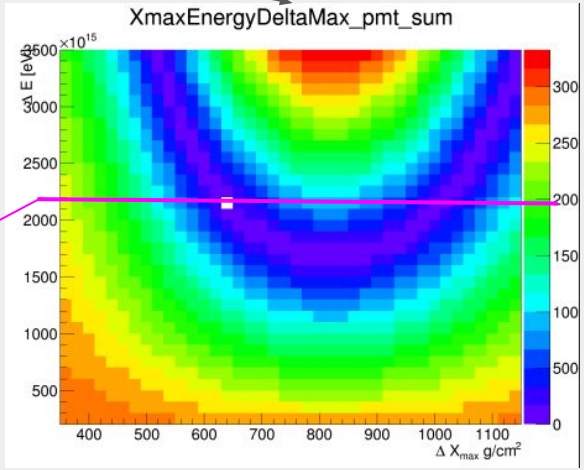
ukázka nutnosti znát přibližné počáteční hodnoty

vývoj hodnoty -2ln$L$ pro různé E, ale s fixním X_{max}
existence minima



vývoj hodnoty -2ln$L$ pro různé X_{max}, ale s fixním E
existence lokálních minim



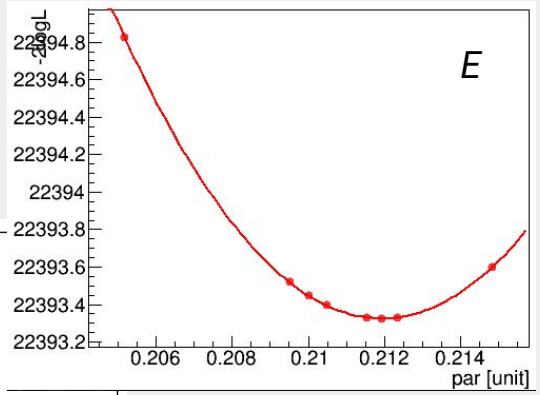


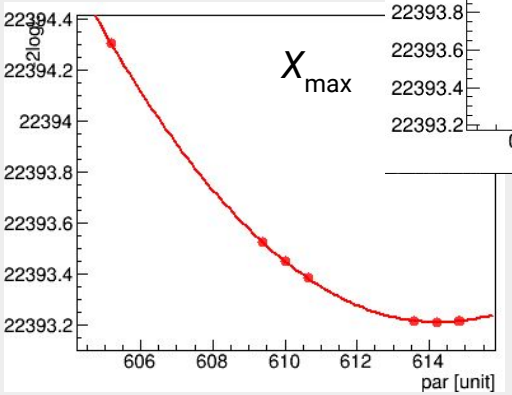
Rekonstrukce - **ideální signál**

- vstupní data do rekonstrukce ze simulace - ideální odezva PMTs
  - částečně jsou některé parametry převzaty z reálné spršky
- simulace: X_{max} = 610 g/cm^2 E = 2.10 EeV
- rekonstrukce: X_{max} = 612 ± 15 g/cm^2 E = 2.11 ± 0.09 EeV

fixní parametry
zenith = 12,75 deg
azimuth = 16,05 deg
core X = -16,85 km
core Y = -24,45 km

- v případě ideálního signálu se rekonstrukce blíží generované spršce
  - aktuální verze FASTFramework je schopna rekonstrukce
  - je potřeba však její pochopení a vyladění vstupních parametrů pro reálný případ (min. pro PAO)
  - minimalizační proces (-2ln$L$) konverguje po očekávatelné křivce
    - E a X_{max} byly rekonstruovány samostatně

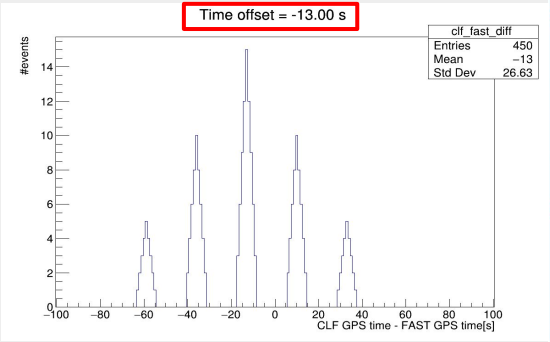




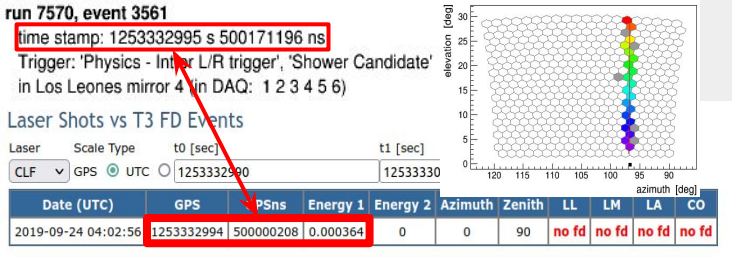
Analýza fyzikálních událostí

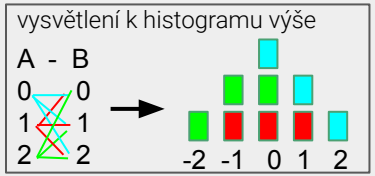
Zpracování dat - FAST@PAO - koincidence s LL bay4 - I

- data od dubna 2019 do konce roku 2020 obsahují **GPS** informaci
- data nabírána interním triggerem, proto byla **nutnost synchronizovat čas** s PAO
- CLF (Central Laser Facility) signál ve směru zorného pole FAST (horizontální CLF)
  - pravidelný vzorec výstřelů
  - zjištění minimální odchylky časů mezi FAST a CLF
  - byla nutná **dodatečná oprava o +1s** (chyba v CLF časech)



Date (UTC)	GPS	GPSns
2019-05-07 06:23:44	1241245442	500000186
2019-05-07 06:23:43	1241245441	500000179
2019-05-07 06:23:42	1241245440	500000185
2019-05-07 06:23:41	1241245439	500000190
2019-05-07 06:23:40	1241245438	500000189
2019-05-07 06:23:21	1241245419	500000172
2019-05-07 06:23:20	1241245418	500000174
2019-05-07 06:23:19	1241245417	500000202
2019-05-07 06:23:18	1241245416	500000178
2019-05-07 06:23:17	1241245415	500000205
2019-05-07 06:22:58	1241245396	500000191
2019-05-07 06:22:57	1241245395	500000200
2019-05-07 06:22:56	1241245394	500000185
2019-05-07 06:22:55	1241245393	500000206
2019-05-07 06:22:54	1241245392	500000193

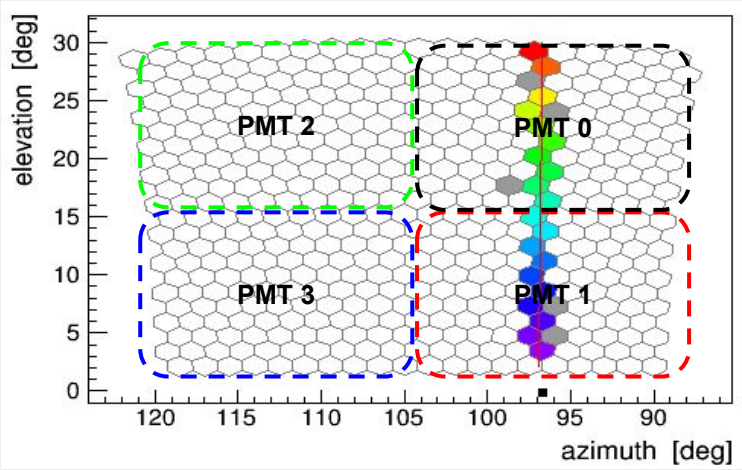




Zpracování dat - FAST@PAO - koincidence s LL bay4 - II

- data od dubna 2019 do konce 2022
- na základě časové značky **nalezeno minimálně 40 událostí** s kandidátem v PAO
  - soubor s PAO daty (pro LL) již nemusel obsahovat většinu detekovaného signálu
  - FAST data vykazují signální události bez nalezení kandidáta v PAO
- **časová shoda** s posunem **~72μs**
  - tento posun je viditelný i pro signál z CLF, pravděpodobně značí nekorigovaný systematický posun

Pixel colours encode time, not energy!

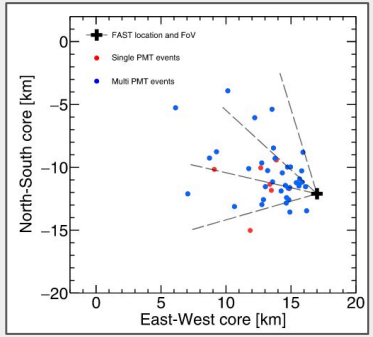


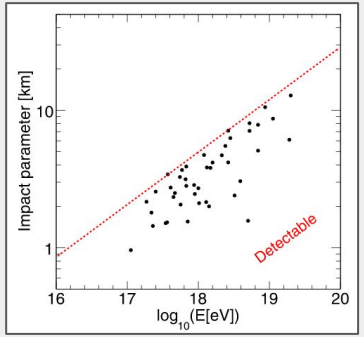
Odezva detektoru na CLF signál.

Zpracování dat - FAST@PAO - koincidence s LL bay4 - III

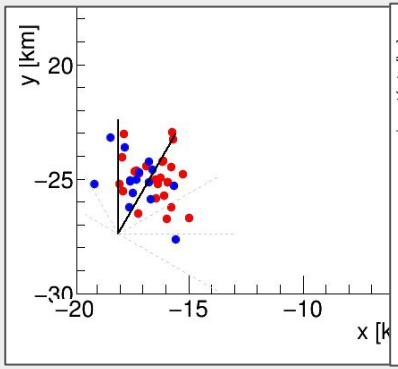
- porovnání vybraných kandidátů z TA a PAO
  - pozice spršky, energie spršky v závislosti na vzdálenosti od detektoru

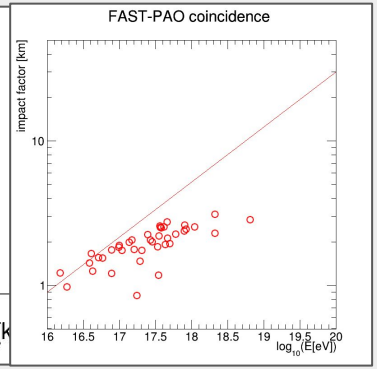
FAST @ TA



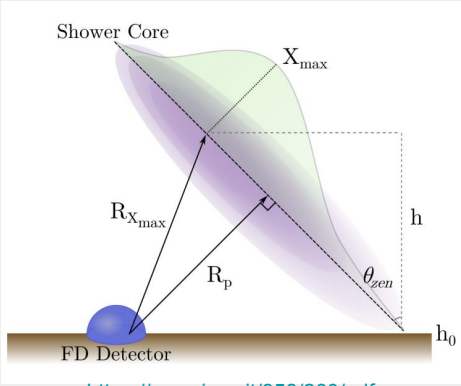


FAST @ PAO





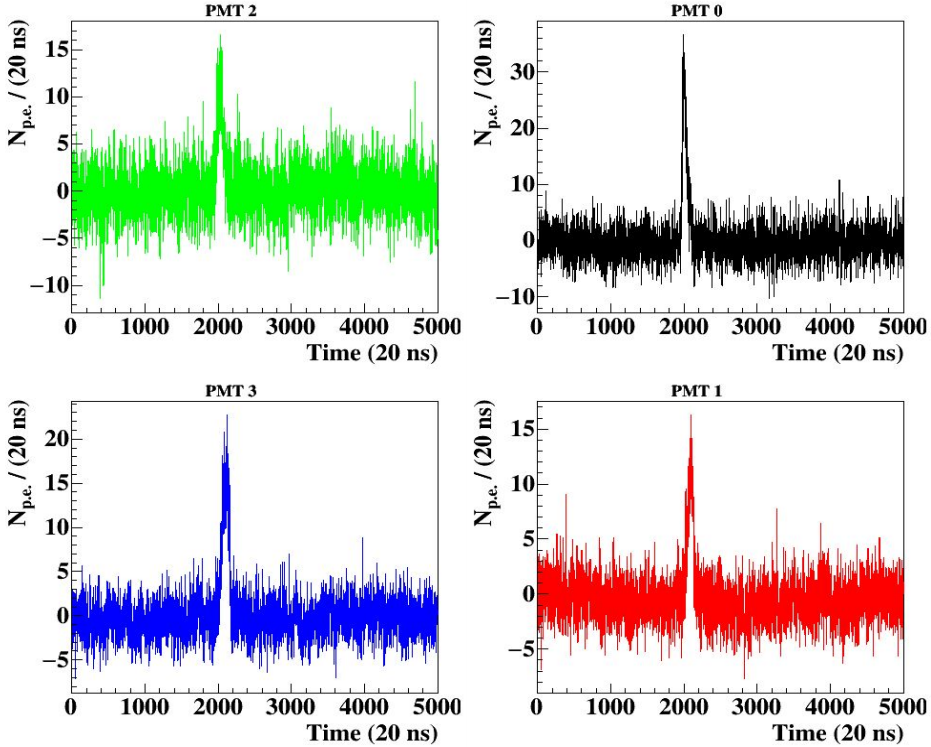
ilustrace geometrie spršky

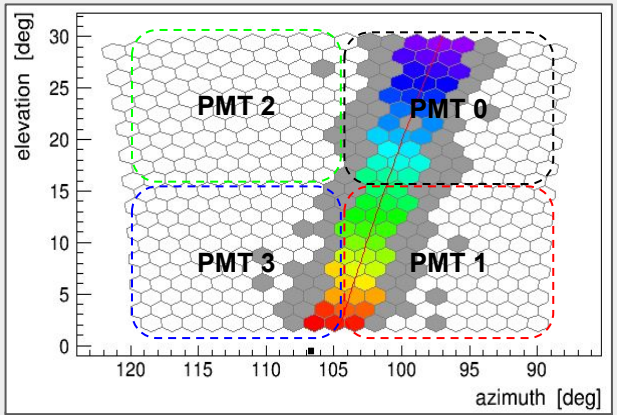


https://pos.sissa.it/358/260/pdf

Zpracování dat - FAST@PAO - koincidence s LL bay4 - IV

- událost z 19. 11. 2020 02:54:44 UTC, **logE = 18.32**





run 8100, event 973
time stamp: 1289789702 s 759759686 ns
Trigger: 'Physics - Int or L/R trigger', 'Shower Candidate'
in Los Leones mirror 4 (in DAQ: 1 2 3 4 5 6)
geometry: hybrid, station 322 (ToT), showerPlaneDistance = 458 m
$(\theta, \phi) = (13.7\pm0.3, 344.4\pm2.8)$ deg
$(x, y) = (-17.54\pm0.01, -25.09\pm0.02)$ km
$R_p = 2.29 \pm 0.02$ km
profile: 4-parameter Gaisser-Hillas (unknown type)
$E = (2.12 \pm 0.14) \times 10^{18}$ eV
$X_{max} = 757 \pm 24$ g/cm^2
$(dE/dX)_{max} = 3.17 \pm 0.09$ PeV/(g/cm^2)
$(\lambda, X_0, fwhm) = (59, -136, 540)$ g/cm^2, $f_{asym} = 0.45$
Cherenkov-fraction = -1%, mva=0 deg.

Zpracování dat - FAST@PAO - koincidence s LL bay4 - IV

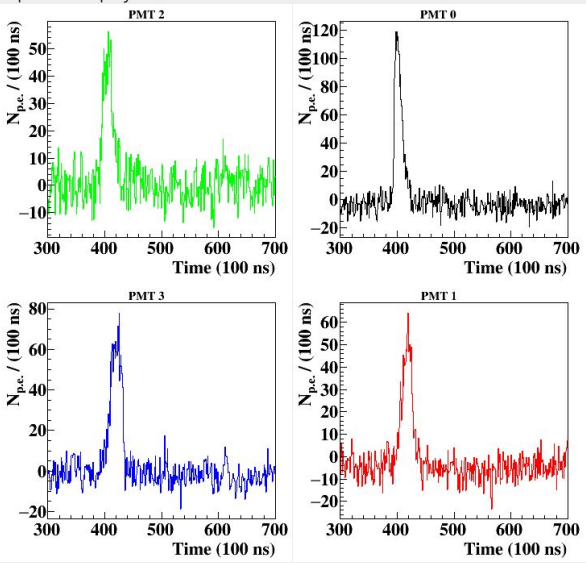
- událost z 19. 11. 2020 02:54:44 UTC, **logE = 18.32**
- PAO: X_{max} = 757 ± 24 g/cm^2 E = 2.12 ± 0.14 EeV
- FAST: X_{max} = 925 ± 23 g/cm^2 E = 1.41 ± 0.07 EeV

fixní parametry

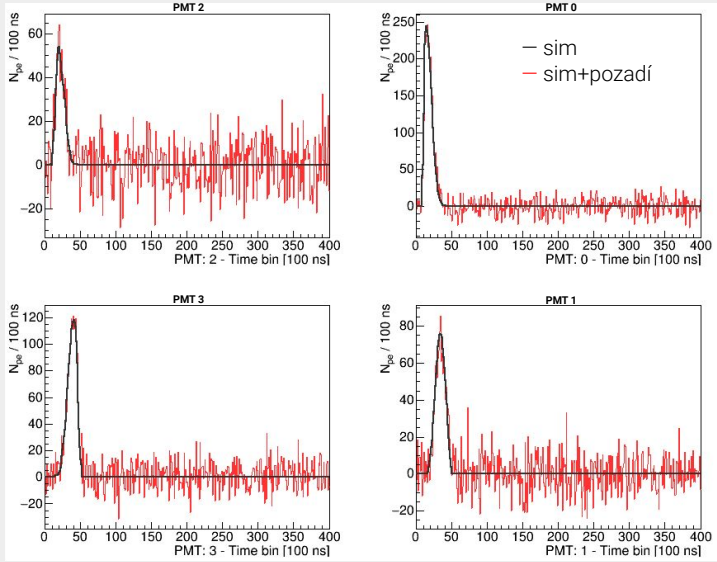
zenith = 13.7 deg
azimuth = 344.4 deg
core X = -17.54 km
core Y = -25.09 km

naměřená data

po dostupných kalibracích



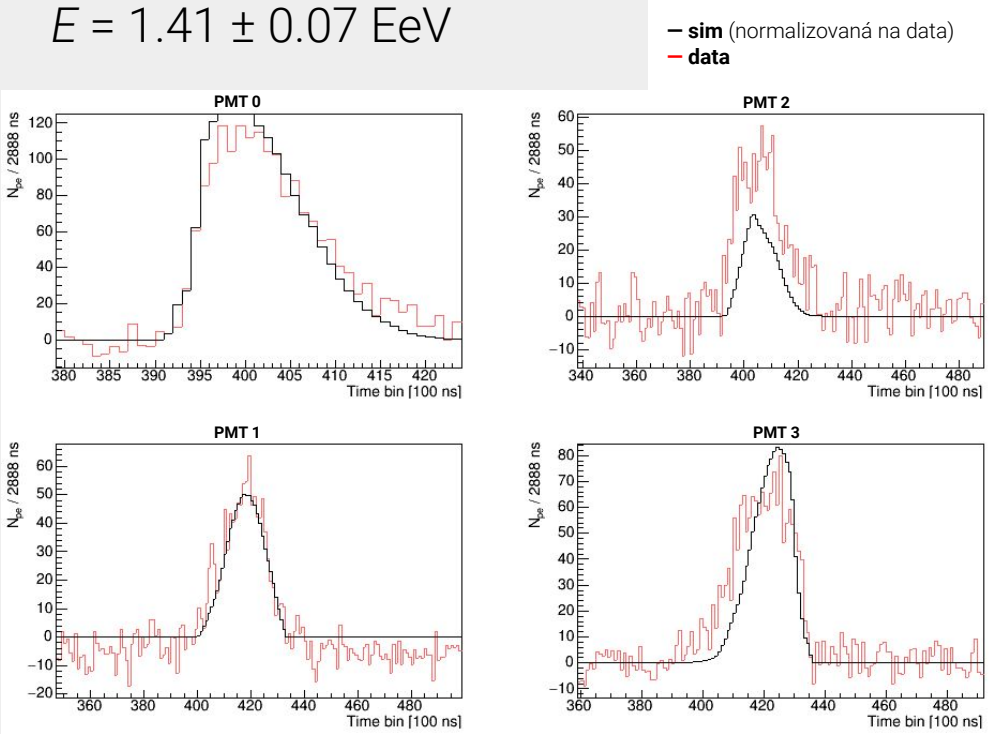
simulace PAO události



Zpracování dat - FAST@PAO - koincidence s LL bay4 - IV

- událost z 19. 11. 2020 02:54:44 UTC, **logE = 18.32**
- PAO: X_{max} = 757 ± 24 g/cm^2 E = 2.12 ± 0.14 EeV
- FAST: X_{max} = 925 ± 23 g/cm^2 E = 1.41 ± 0.07 EeV

- simulace (zatím) nedokáže popsat parazitní nebo dodatečně odražený signál, který je vidět v naměřených datech (zde PMT 2 a PMT 3)
- tato skutečnost může stát za nepřesností rekonstrukce dat
- výsledky jsou řádově správné
- konečné chyby exceptovatelné
-



Plán

Další kroky

- kalibrace
  - teplotní kalibrace - zisk fotonásobičů v závislosti na napětí a teplotě
  - UV LED - nabírání statistiky dat
    - analýza s potenciálním využití pro relativní kalibraci signálu fotonásobičů
    - nahrazení YAP kalibrace
  - YAP kalibrace - potenciál k vylepšení výsledku,
    - nevýhoda: “bodová” relativní kalibrace
    - relativní teplotní kalibrace signálu (minimálně pro data s TA)
    - studium stability teplotní závislosti
- zpracování signálu
  - příprava algoritmu pro výběr událostí v “reálném” čase
  - vyhledání signálních kandidátů pro měření s externím triggerem

Další kroky

- simulace
  - zpřesnění modelu pro popis odezvy na PMTs reálných dat
  - aktualizace kódu FastFramework pro novější AugerOffline
  - implementace kalibračních konstant
- rekonstrukce
  - kroky společné pro simulaci
  - neuronové sítě
    - potřeba pochopit aktuální stav, implementaci a použití
    - navázat úzkou spolupráci s T. Fujii a Fraserem Bradfieldem (Ph.D. student pod vedením T.F.)
- ostatní studie
  - stanovení (geometrických, energetických) limitů detekce UHECR detektory FAST
    - systematika detektoru