

TALE実験の現状と今後

藤原亮太(大阪市立大学 M1)

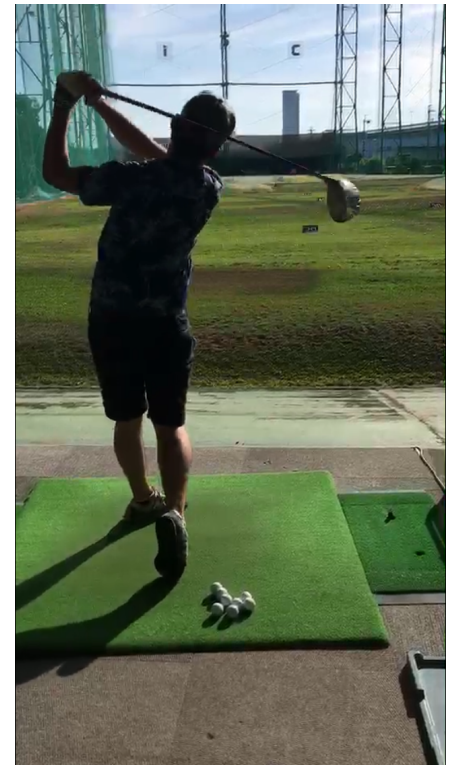
自己紹介

藤原 亮太(ふじわら りょうた)
大阪市立大学 宇宙線物理学研究室 M1
TALE-SDのハードウェアやソフトウェア
の開発や研究をしています。

生まれも育ちも大阪です。

小学校から大学まで野球をやってきました。
一応、阪神タイガースのファンです。

最近はゴルフにハマっています。



宇宙線

- 宇宙を飛び交う、高エネルギーの粒子
エネルギー：およそ 10^9 eV 以上粒子：
陽子, 原子核, 電子, etc.

- ある運動量 p の荷電粒子(電荷 Z)が
磁場 B 中で運動するときの半径 r は、

$$r = p/(ZeB)$$

$$r \propto \frac{E}{Z} \quad (\because \text{近似的に } p \propto E)$$

- Knee $\sim 5 \times 10^{15}$ eV
- 2nd Knee $\sim 2 \times 10^{17}$ eV

約26倍

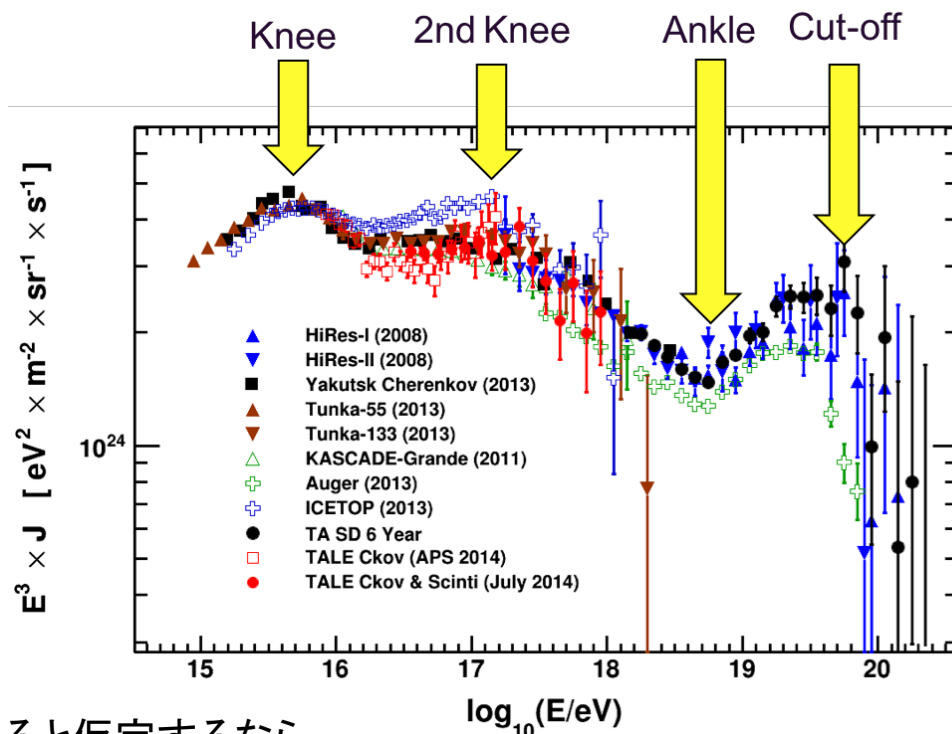
→銀河系からのもれ出しが r に依存すると仮定するなら

Kneeは陽子($Z=1$)の閉じ込め限界で

2nd Kneeは鉄($Z=26$)の閉じ込め限界を表しているのでは
ないかと考えられる。

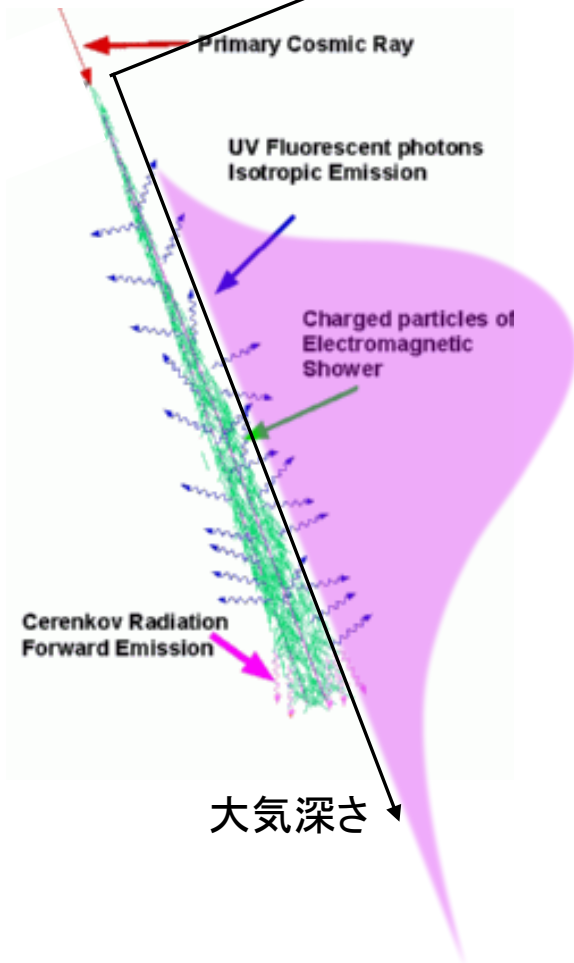
- Ankle付近の質量組成はpure protonであると考えられる。(銀河系外起源?)

- Cut-off：宇宙線陽子がCMBと一回の相互作用で10%以上のエネルギーを失うため、 $\sim 10^{20}$ eVを超える
エネルギーの宇宙線の地球に到来する頻度は格段に減少する。(GZKカットオフ)



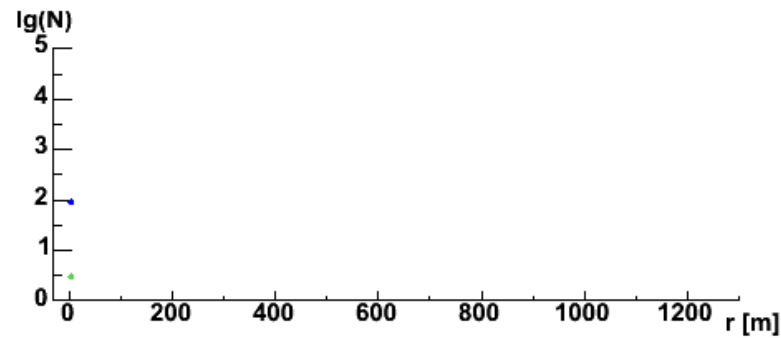
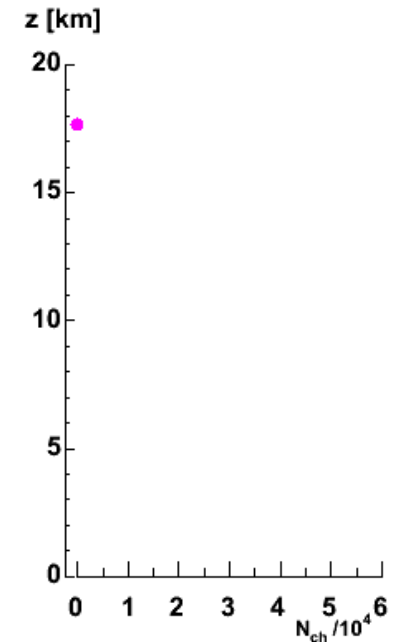
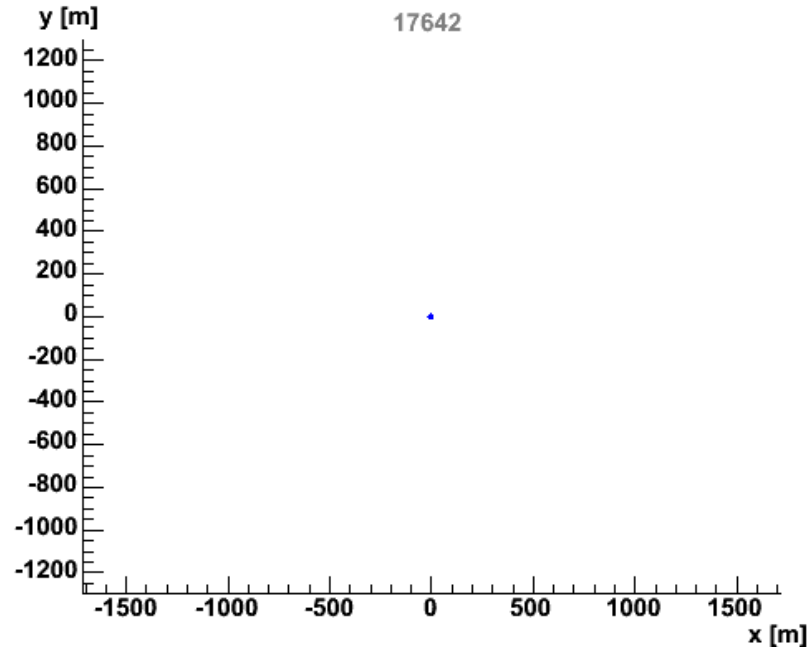
空気シャワー現象

粒子数



大気深さ

空気シャワーシミュレーション



Proton 10^{14} eV

$h^{1st} = 17642$ m

hadrons muons

neutrons electrs

J.Oehlschlaeger, R. Engel, FZ Karlsruhe

CORSIKA software

<https://web.i kp.kit.edu/corsika/movies>

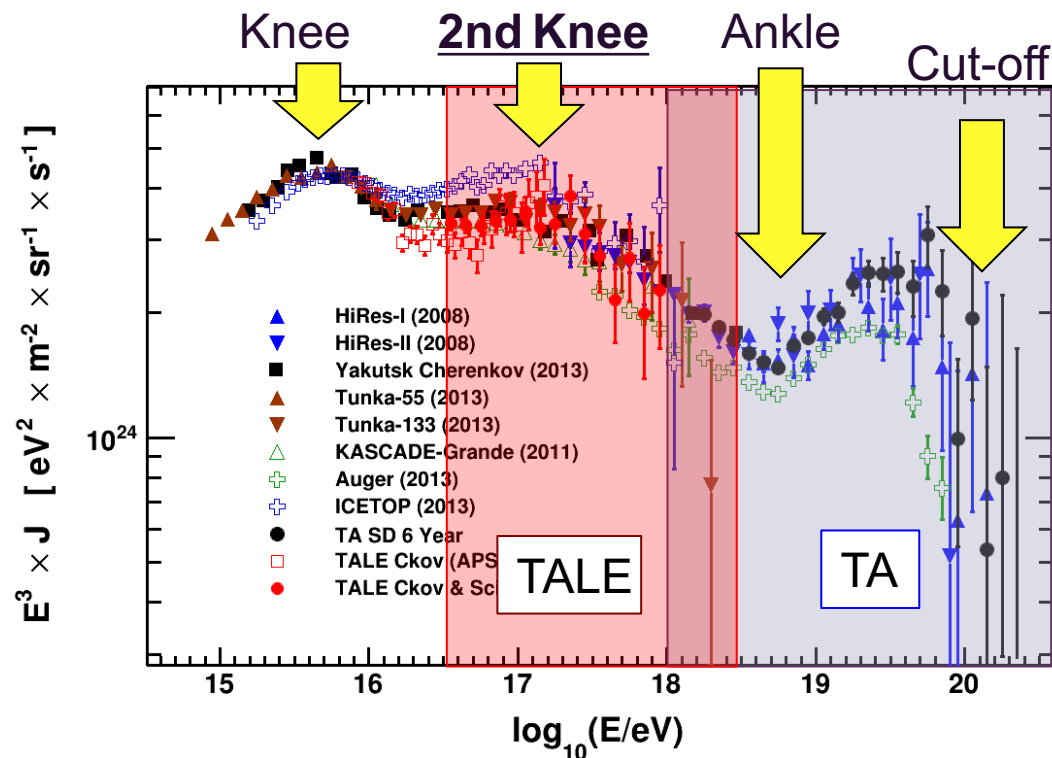
TALE実験の目的

宇宙線とは

宇宙を飛び交う高エネルギー荷電粒子。

地球への到来頻度はエネルギーの-3乗で減少する。

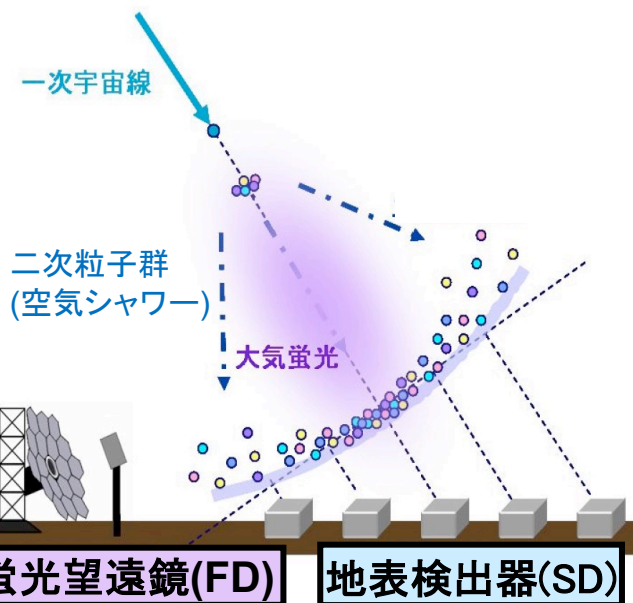
$$F(E) = K \times E^{-\gamma} (\gamma \sim 3)$$



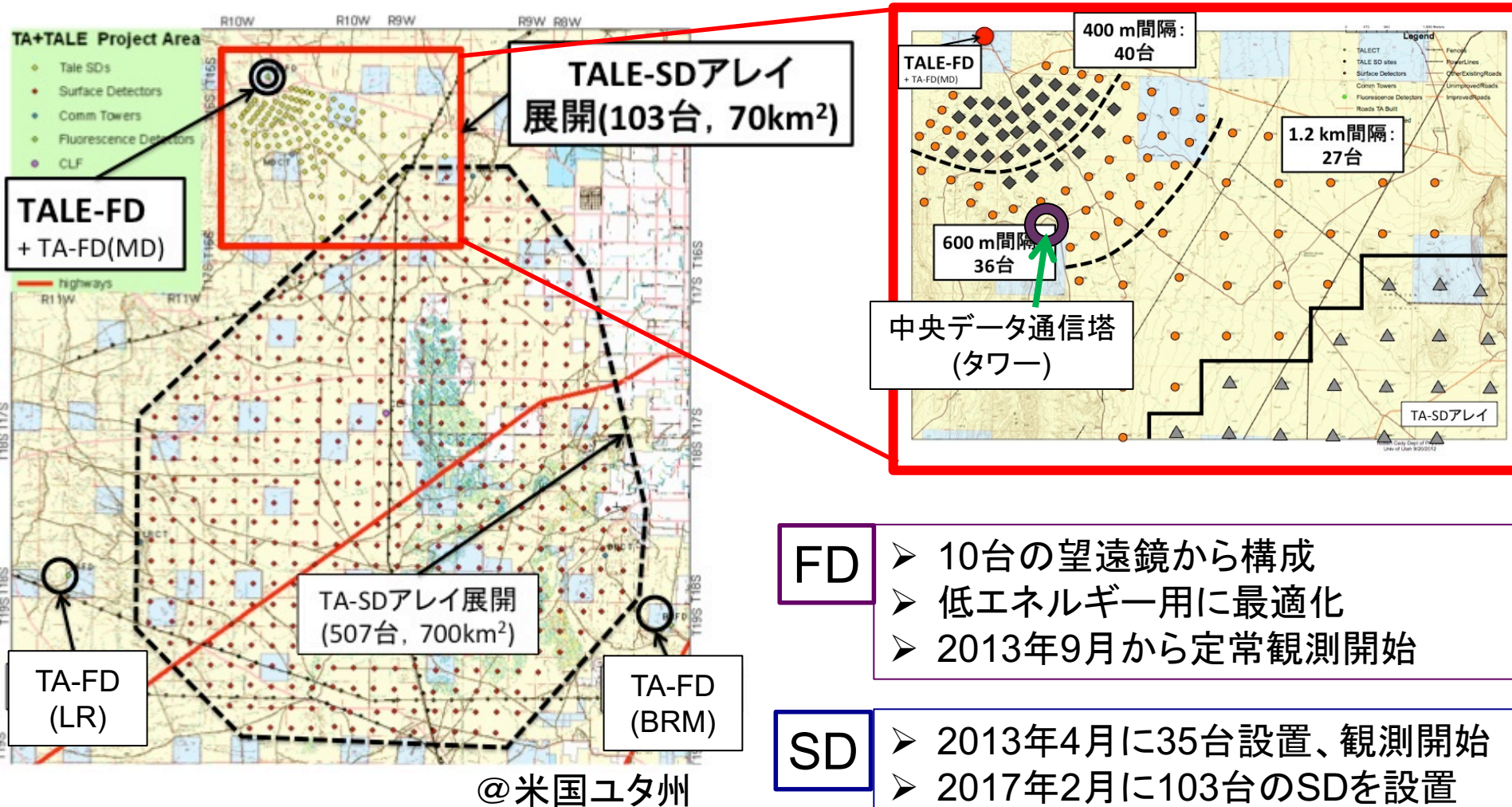
- 2nd Knee領域...宇宙線の起源が
銀河系内→銀河系外と遷移している？
- このエネルギー領域の宇宙線
 - ✓ スペクトルの構造
 - ✓ 質量組成
 について精密に測定したい。

「TALE実験」

SDとFDによる同一イベント観測によって、
小さな系統誤差による測定が可能



TA Low energy Extension (TALE)実験



FD

- 10台の望遠鏡から構成
- 低エネルギー用に最適化
- 2013年9月から定常観測開始

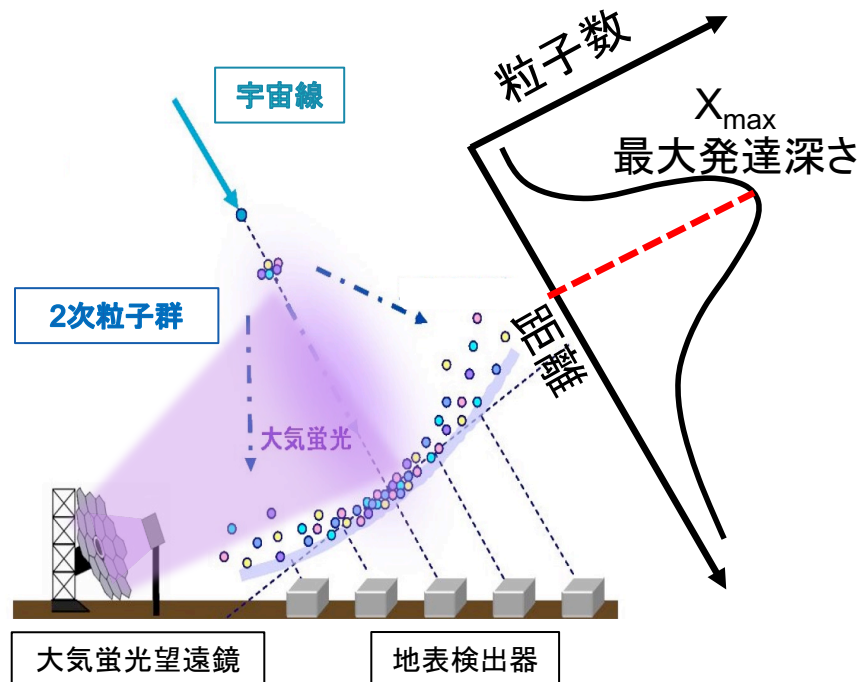
SD

- 2013年4月に35台設置、観測開始
- 2017年2月に103台のSDを設置
- 現在(2018年9月)82台で稼働

TALE-FD



- 2次粒子群により空気中の窒素分子が励起され、結果として波長が 300 ～ 400 [nm] の大気蛍光が放射される
 - FD ではこの大気蛍光を集光
- 大気蛍光は微弱なため、月のない晴天の夜に観測実施
- 宇宙線のエネルギー、到来方向、縦方向発達を測定



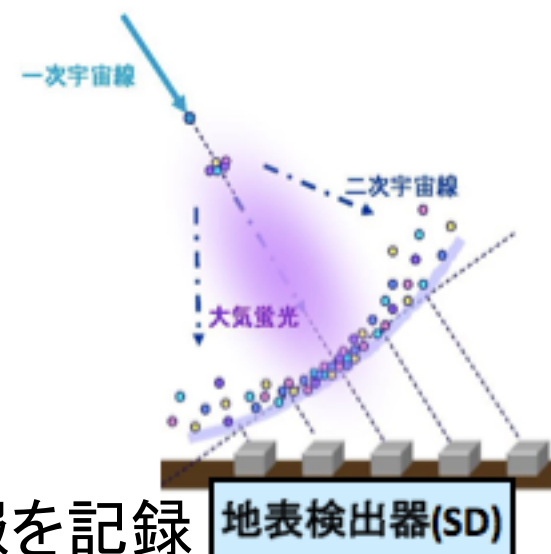
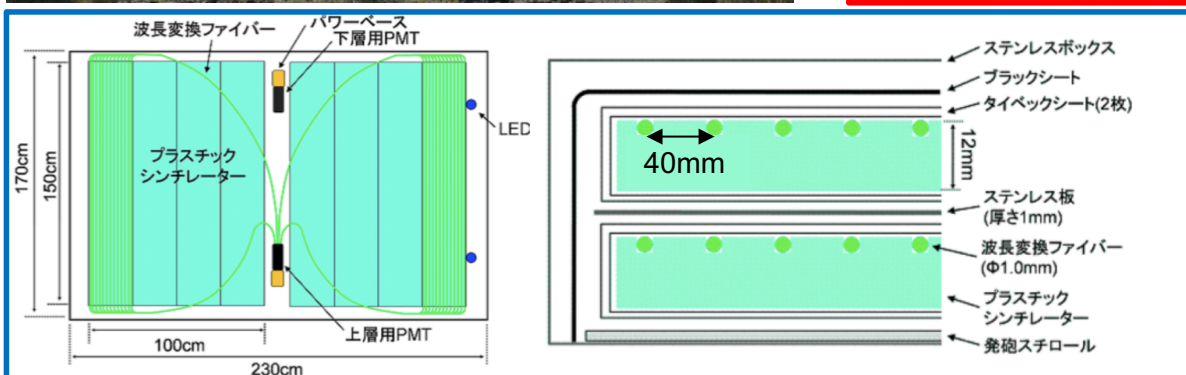
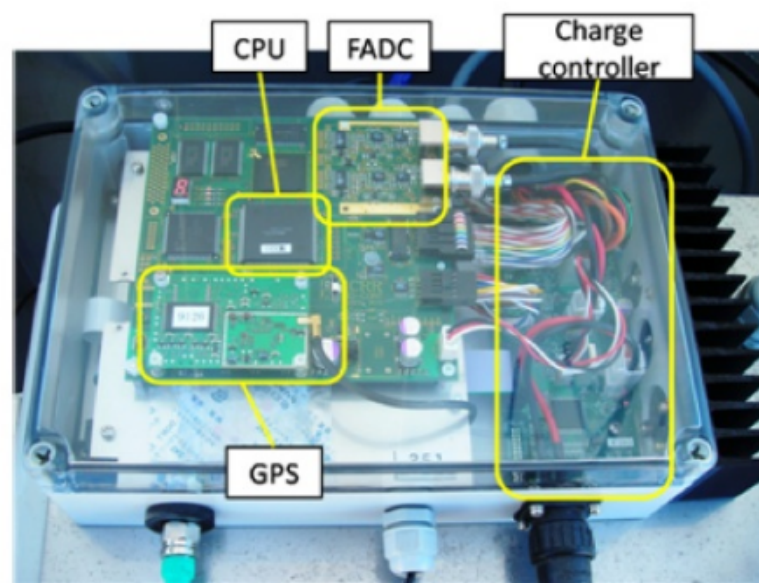
縦方向発達とは

- 空気シャワー中の粒子数は大気を進むにつれて増加し、最大を迎えたあと減少する様子
- 粒子数が最大となる時の大気深さのことを $X_{\max}$ といい、縦方向発達の様子を表すパラメータになる

TALE-SD



制御エレクトロニクス



- シンチレーション検出器(荷電粒子検出)
- 3粒子相当以上の信号の時刻情報と
0.3粒子相当以上の信号の時刻と波形情報を記録

地表検出器(SD)

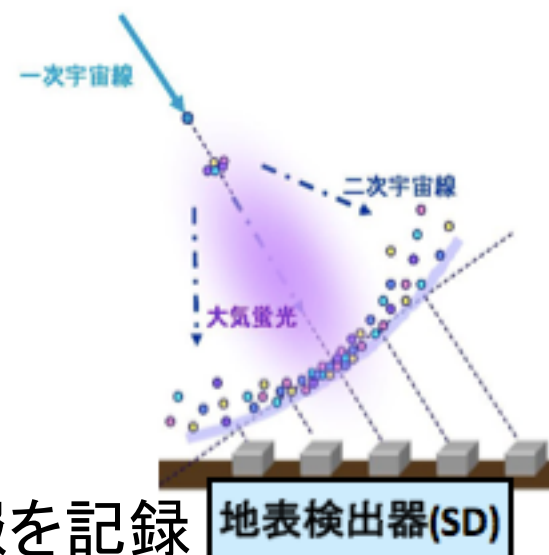
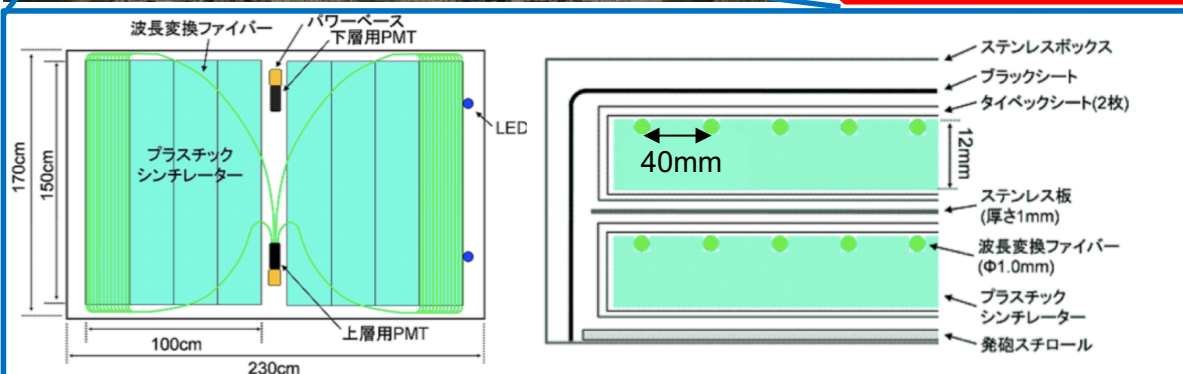
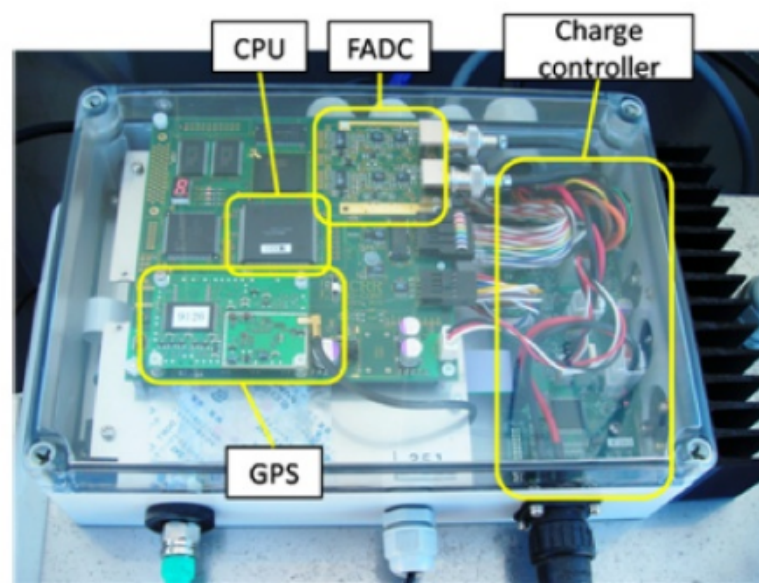
TALE-SD

無線通信アンテナ

ソーラーパネル

シンチレーター

制御エレクトロニクス



- シンチレーション検出器(荷電粒子検出)
- 3粒子相当以上の信号の時刻情報と
0.3粒子相当以上の信号の時刻と波形情報を記録

ハイブリッド観測

- ハイブリッド観測：地表検出器(SD)と大気蛍光望遠鏡(FD)を組み合わせてより精度の良い同一イベントの観測を実現

- FD単眼

- ✓ 空気シャワーを2次元で見るためシャワー軸の決定精度が良くない

ex) TA実験の場合

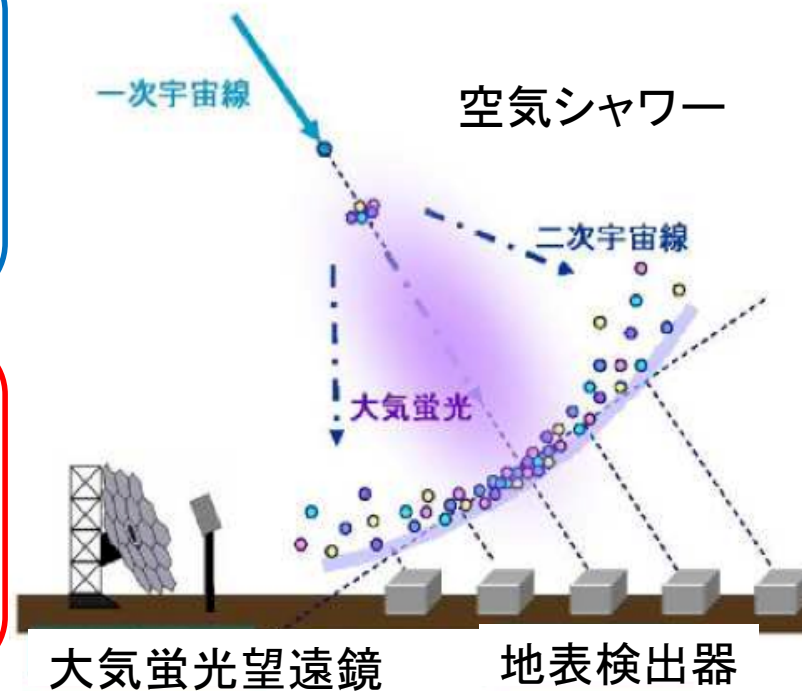
$$@10^{18.2}\text{eV} \quad \Delta\theta = 5^\circ \quad \Delta X_{\text{max}} = 60\text{g}/\text{cm}^2$$

- SD & FD ハイブリッド

- ✓ SDからの地表の情報を加えることによりシャワー軸の決定精度が良くなる

ex) TA実験の場合

$$@10^{18.2}\text{eV} \quad \Delta\theta = 1^\circ \quad \Delta X_{\text{max}} = 20\text{g}/\text{cm}^2$$



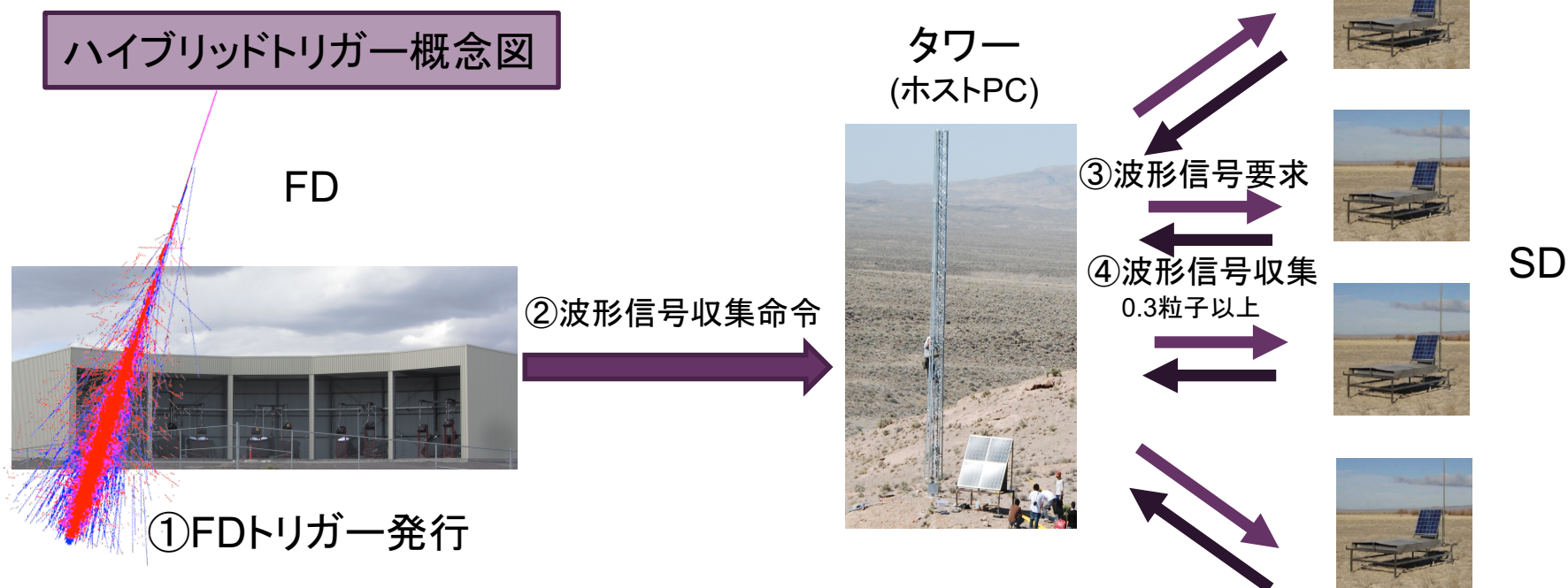
- 精度の良い観測

- ✓ X_{max} の決定精度がより良くなる

➢ 一次宇宙線の組成の決定精度が良くなる

ハイブリッドトリガーシステムの開発

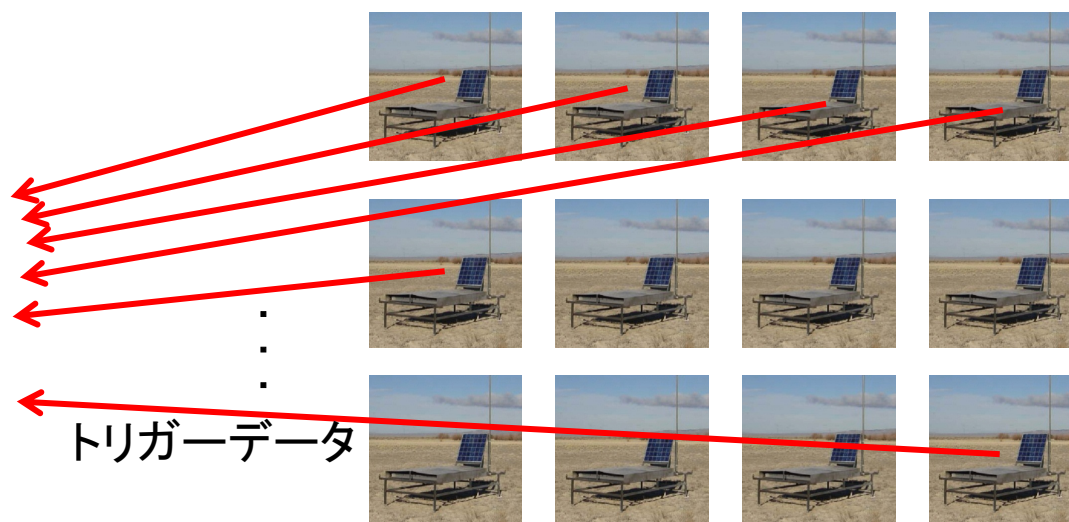
- FDのトリガーに合わせて、SDでも波形収集を行うハイブリッドトリガーシステムを開発した。
 - OCU内でハイブリッドトリガーシステムの実装向け実験を行った。



DAQサイクル ホストPCの視点から

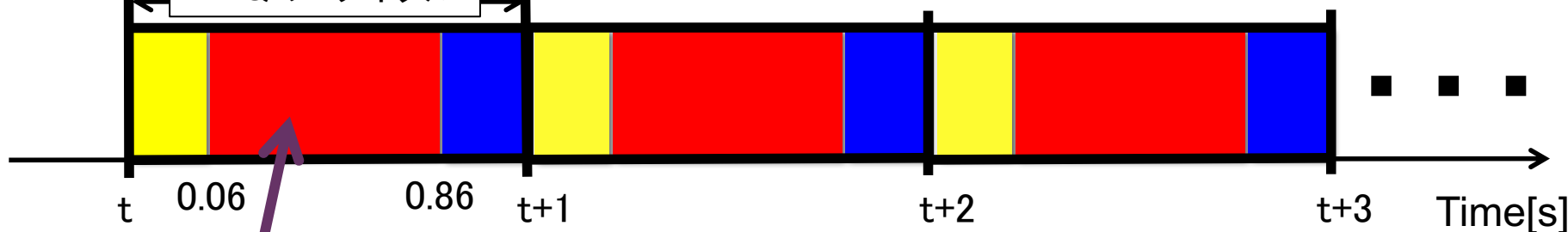
- DAQサイクルは1秒で1サイクル。
- ホストPCは毎サイクル(毎秒)全SDからトリガーデータを収集する。(図: 赤の領域[800ms])
 - トリガーデータ...3粒子相当以上の信号の時間情報

ホストPC
(Raspberry Pi)



SD

DAQの1サイクル



全SDからトリガーデータ収集
(3粒子相当以上の信号)

DAQサイクル ホストPCの視点から

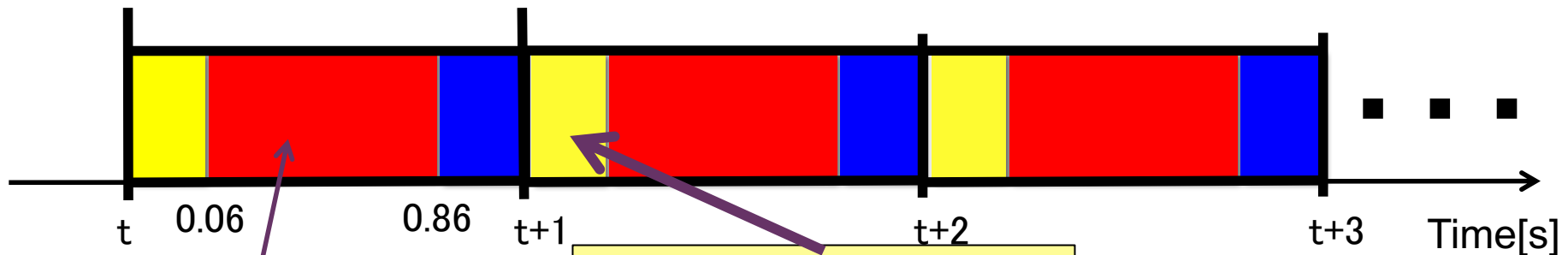
- ホストPCはSDから集めたトリガーデータを調べて、コインシデンス判定を行う。
(図: 黄の領域)

コインシデンス条件

- 3粒子相当以上の信号
- 5台以上のSD
- 時間幅 $8\mu\text{s}$



SD



全SDからトリガーデータ収集
(3粒子相当以上の信号)

コインシデンスの判定
(3粒子相当以上の信号、SD5
台以上、時間幅 $8\mu\text{s}$)

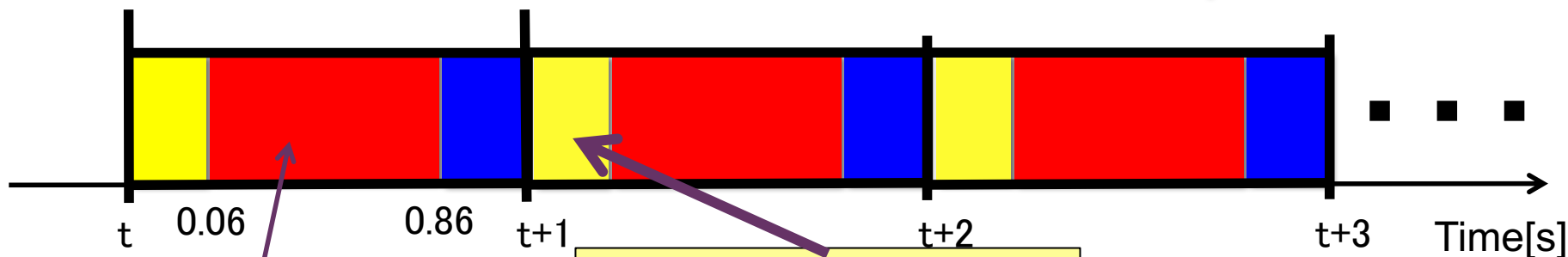
DAQサイクル ホストPCの視点から

- ホストPCはSDから集めたトリガーデータを調べて、コインシデンス判定を行う。
(図: 黄の領域)

コインシデンス条件

- 3粒子相当以上の信号
- 5台以上のSD
- 時間幅 $8\mu\text{s}$

コインシデンス
ホストトリガー発行!



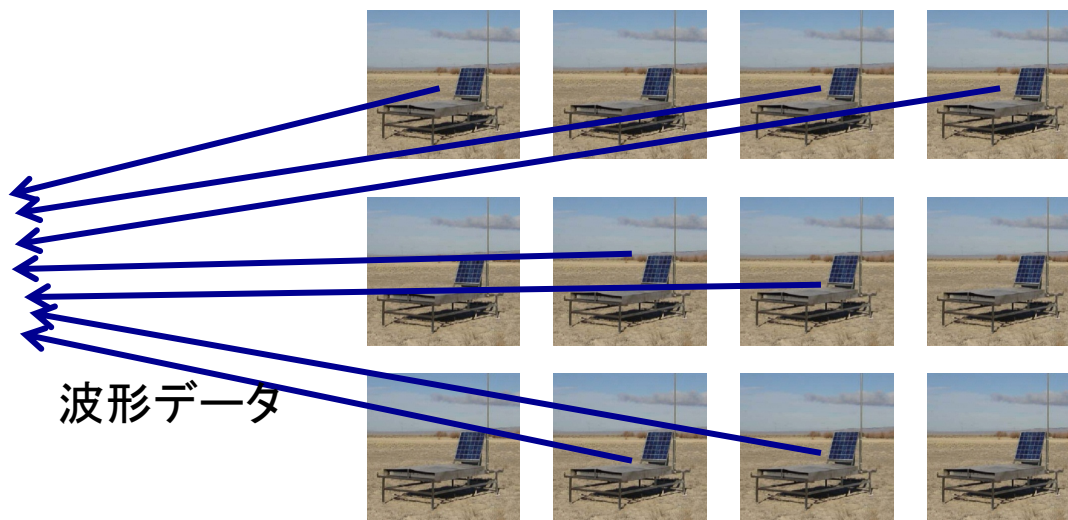
全SDからトリガーデータ収集
(3粒子相当以上の信号)

コインシデンスの判定
(3粒子相当以上の信号、SD5
台以上、時間幅 $8\mu\text{s}$)

DAQサイクル ホストPCの視点から

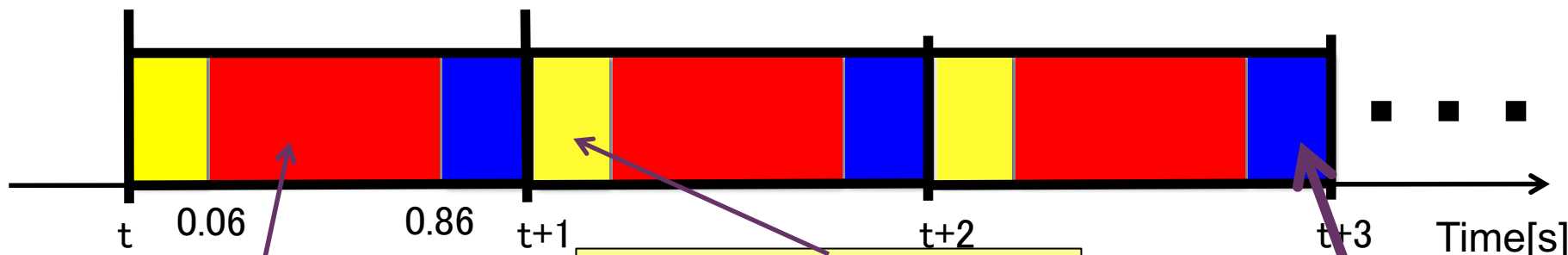
- ホストPCはコインシデンストリガーがかかると、その時刻付近に波形を持っているSDから波形データを収集する。(図: 青の領域)
 - 波形データ...0.3粒子相当以上の信号の波形

ホストPC
(Raspberry Pi)



SD

波形データ



全SDからトリガーデータ収集
(3粒子相当以上の信号)

コインシデンスの判定
(3粒子相当以上の信号、SD5
台以上、時間幅8 μ s)

波形収集
0.3粒子相当以上の信号

ハイブリッド観測

- ハイブリッド観測: 地表検出器(SD)と大気蛍光望遠鏡(FD)を組み合わせることでより精度の良い同一イベントの観測を実現

- FD単眼

- ✓ 空気シャワーを2次元で見るためシャワー軸の決定精度が良くない

ex) TA実験の場合

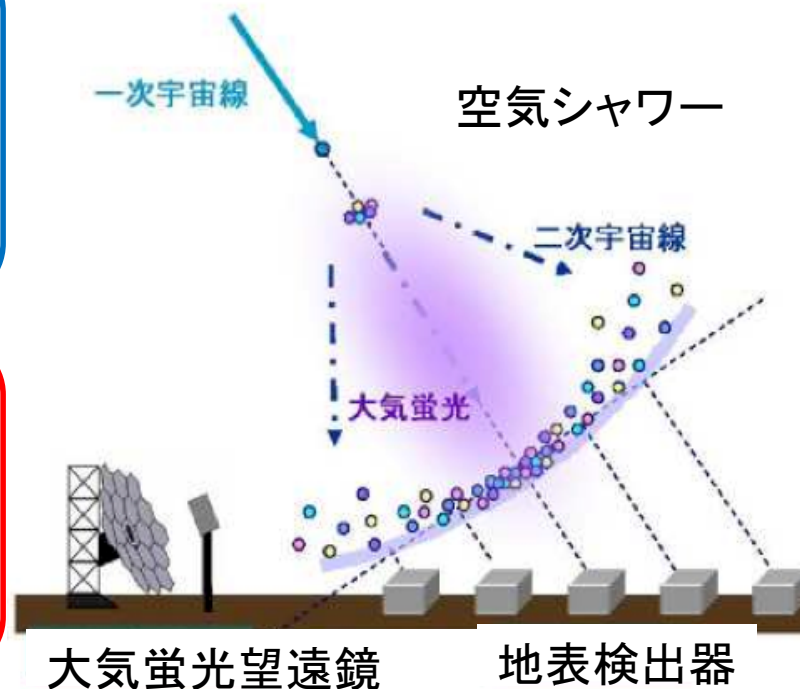
$$@10^{18.2}\text{eV} \quad \Delta\theta = 5^\circ \quad \Delta X_{\text{max}} = 60\text{g}/\text{cm}^2$$

- SD & FD ハイブリッド

- ✓ SDからの地表の情報を加えることによりシャワー軸の決定精度が良くなる

ex) TA実験の場合

$$@10^{18.2}\text{eV} \quad \Delta\theta = 1^\circ \quad \Delta X_{\text{max}} = 20\text{g}/\text{cm}^2$$

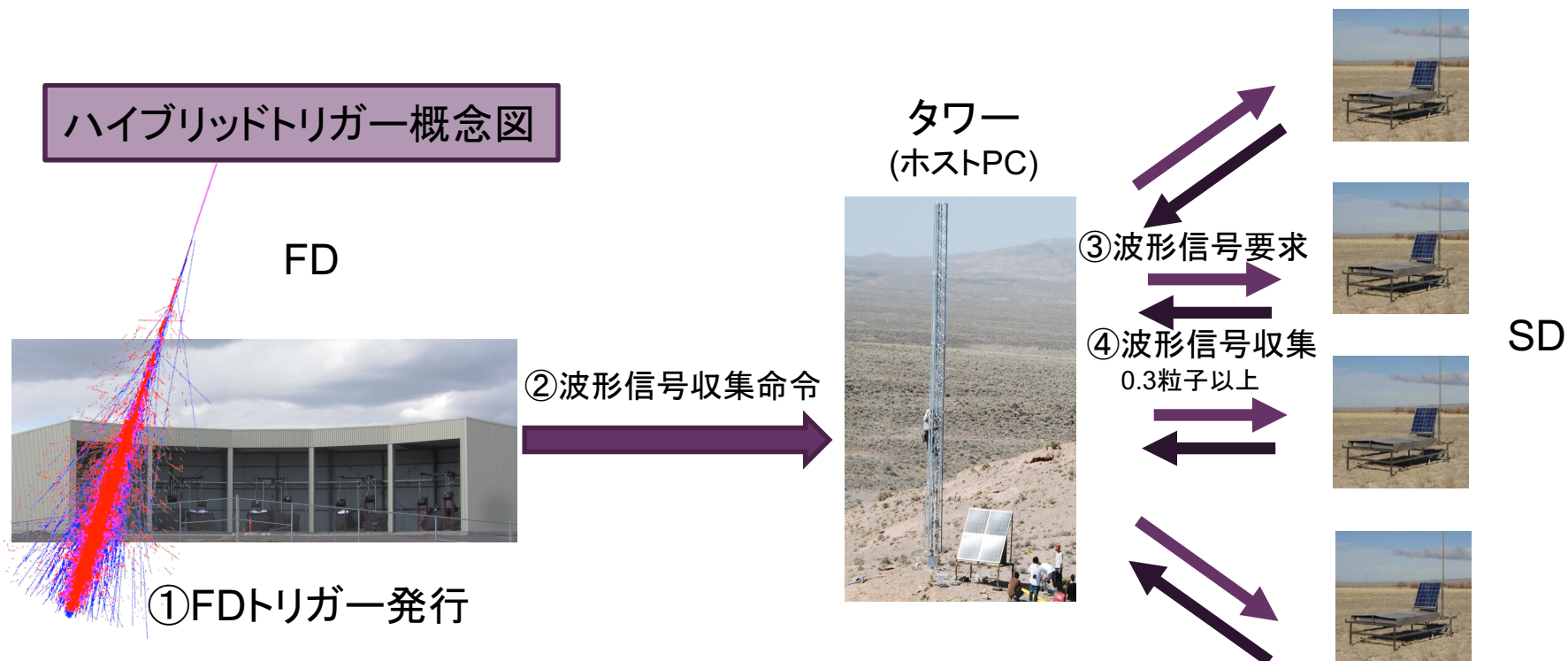


- 精度の良い観測

- ✓ X_{max} の決定精度がより良くなる
 - 一次宇宙線の組成の決定精度が良くなる

ハイブリッドトリガーシステムの開発

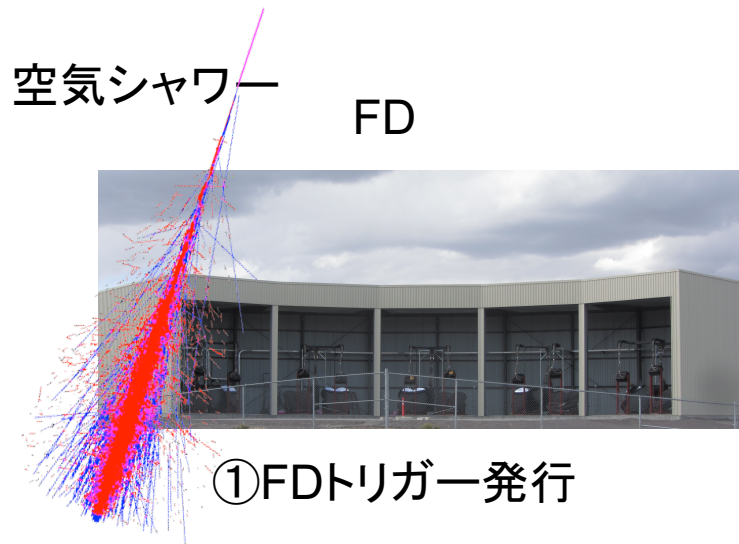
- FDのトリガーに合わせて、SDでも波形収集を行うハイブリッドトリガーシステムを開発した。
 - OCU内でハイブリッドトリガーシステムの実装へ向け実験を行っている。



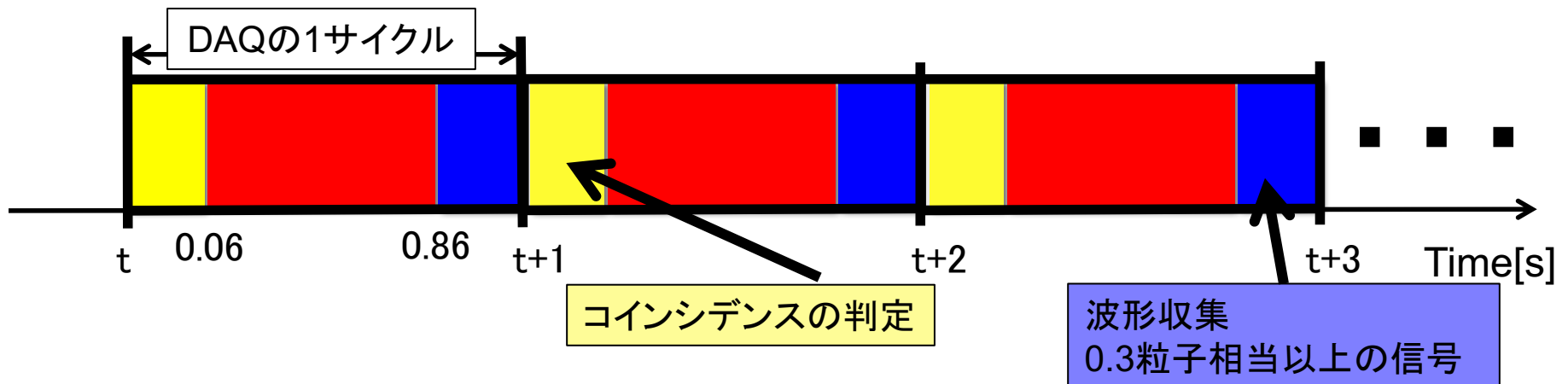
DAQサイクル内でのFDからのトリガー受信

FDからの外部トリガー受信をホストPCのDAQサイクル内で行う

ホストPC
(Raspberry Pi)



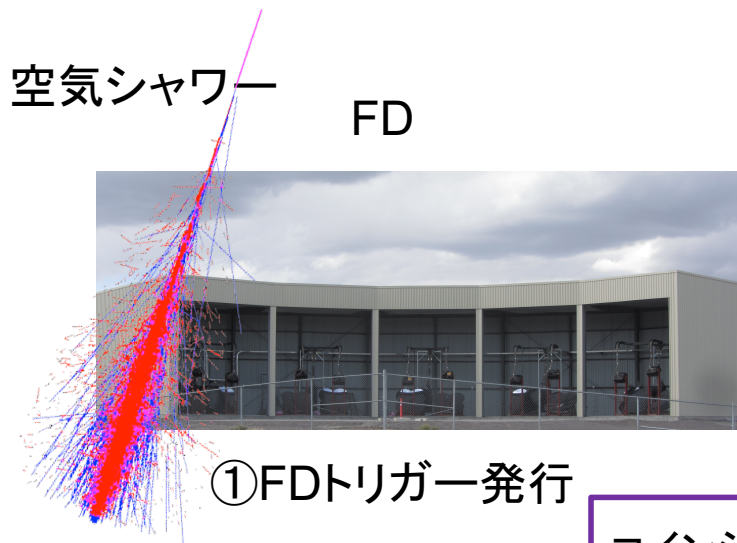
②波形信号収集命令



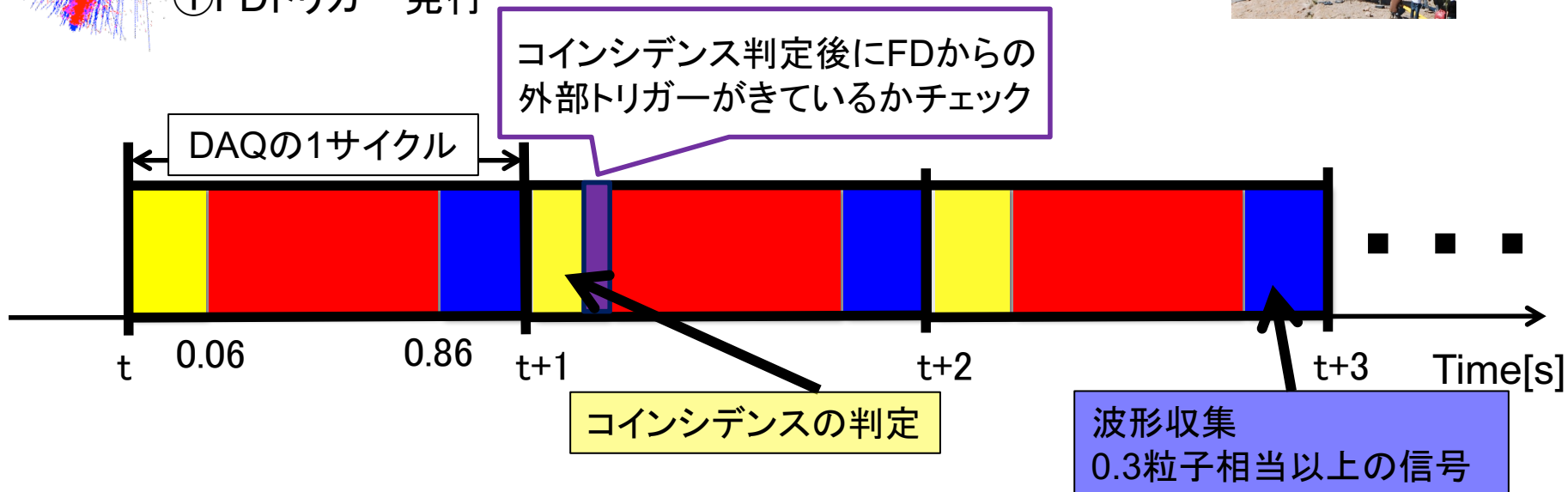
DAQサイクル内でのFDからのトリガー受信

FDからの外部トリガー受信をホストPCのDAQサイクル内で行う

ホストPC
(Raspberry Pi)



②波形信号収集命令



DAQサイクル内でのFDからのトリガー受信

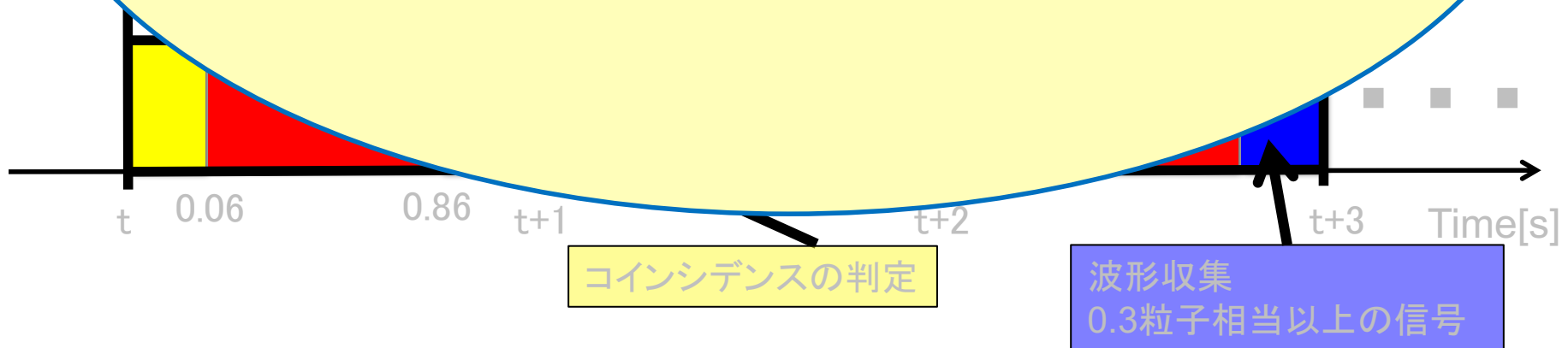
FDからの外部トリガー受信をホストPCのDAQサイクル内で行う

ホストPC
(Raspberry Pi)

空気シャワー

2018年9月に3週間米国ユタ州へ行き
ハイブリッドトリガーシステムを導入完了

2018年9月からハイブリッド観測開始!!



TALEサイトでの一枚(2018/09/12)



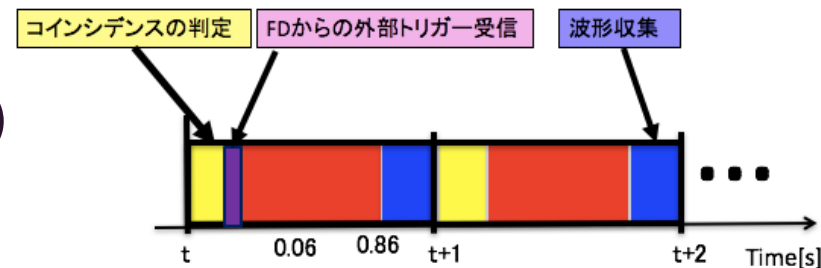
TALEサイトでの一枚(201 TALE FD



HYBRID TRIGGER EVENT DATA(1)

- TALE-SD host PC(Raspberry Pi) output files
 - .Y file = 生データ
 - .H file = 生データからFDからの外部トリガー時刻情報
- TALE-FD hybrid trigger sending file
 - .hybtrig.log file = TALE-SDに対して送ったトリガー時刻情報を出力

HYBRID TRIGGER EVENT DATA(2)



y2018m09d18.hybtrig.log

```
11:34:53.007 Trig connection closed
11:35:20.741 filter: tid 6014 prescale trigger 1537270519.722193 physics criteria NOT USED for now
11:35:20.741 Trigger @ 1537270519.722193 #e1 0 13fb0511
11:35:20.741 Trig connected
11:35:22.723 Trig sent '11 5 fb 13'
11:35:32.723 Trig connection closed
```

MD091811.Y2018

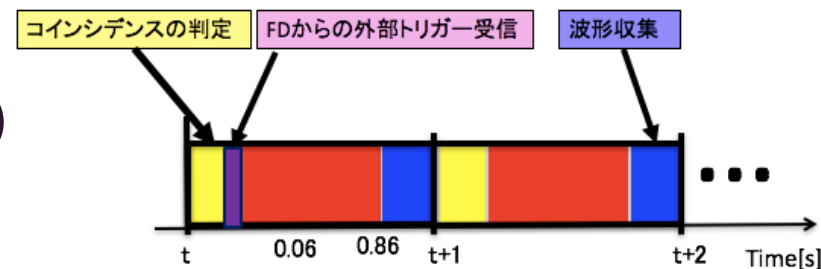
```
#T 000113ed 180918 113522 1714 322 0
#A 0 0 0 0
#C 0 0 0 0
L 5401 fffed824 0 321 0 019 2faef29 0 0 0 0
04
FD TRIG DATA RECV
a = 0
a = 1
fd_tmp_time[0]=13fb0511
```

MD091811.H2018

```
#End1pps
#T 000113ed 180918 113522 1714 322 0
FD TRIG DATA RECV RECV DATA[0] = 13fb0511 319 722193
FD trigger judge start 13fb0511
#e1 0 13fb0511
#End1pps
#T 000113ee 180918 113523 1821 323 0
waveform collect done timebin=319 usec=722193 13fb0511
#End1pps
```

Hybrid trigger information (13fb0511) $\longrightarrow$ timebin = 319(sec) μ sec = 722193(μ s)

HYBRID TRIGGER EVENT DATA(3)



SDから波形収集した結果(DET 5403 ,5708)

・全SDに対して波形探索時間幅 = 722193 ± 32 (μs)

```
W 5403 1
w 0 0 132
4226fbab
03c00286
00007005
```

← トリガー-clock

・
・
・

```
7e007004
7f007004
02fae6c6
d8303824
```

← 内部-clock

```
W 5708 1
w 0 0 132
4226feea
0365023e
00007004
```

・
・
・

```
7e006004
7f006004
02fae6de
e4803022
### DONE 000000 13fb0511
#t 783766 0 0 0 0
```

→ waveform time information

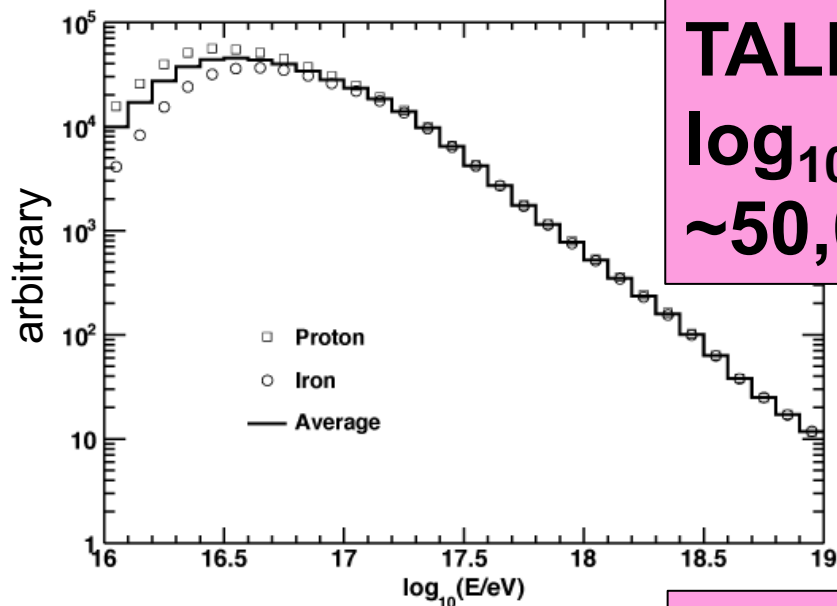
$$722191(\mu\text{s}) = 722193 - 2 (\mu\text{s})$$

→ waveform time information

$$722207(\mu\text{s}) = 722193 + 14 (\mu\text{s})$$

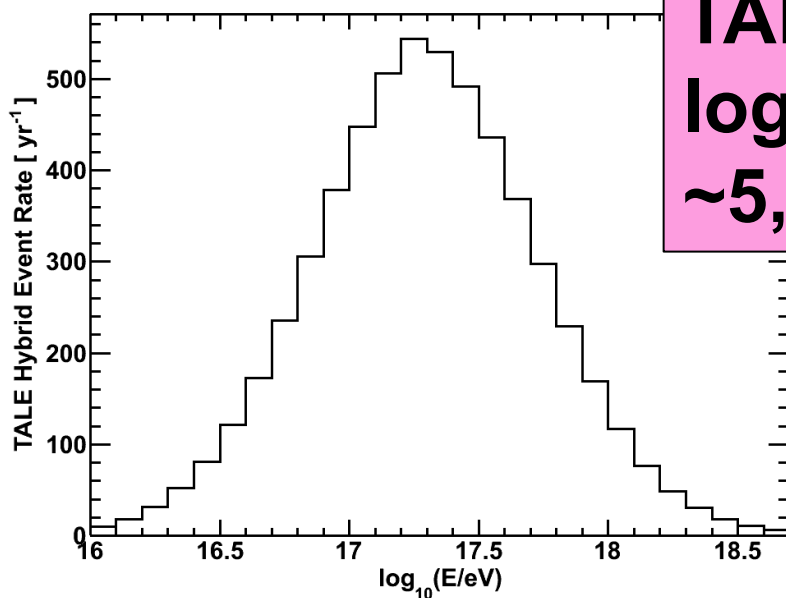
今後データ量が増えていけば解析をしていきます。

TALE sensitivity (MC study)



TALE SD (trigger)
 $\log_{10}(E_{\text{mode}}) = 16.5$
 $\sim 50,000$ events/yr

TA SD array (loose cut)
 $\log_{10} E > 18.0$
 $\sim 26,000$ events/yr



TALE Hybrid (trigger)
 $\log_{10}(E_{\text{mode}}) = 17.3$
 $\sim 5,000$ events/yr

TALEハブリッドの期待される性能

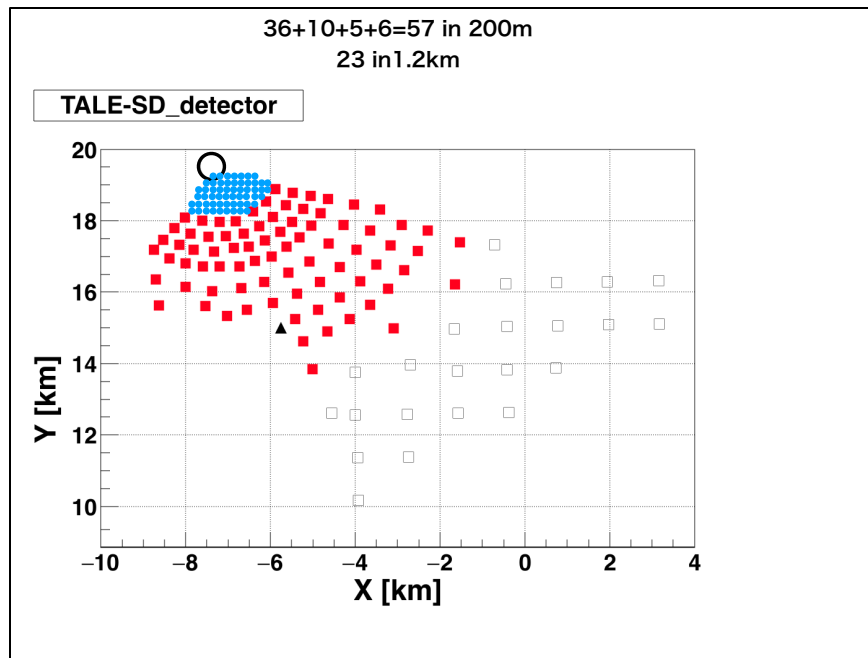
到来方向決定精度 = 1.0° (FD単眼: 5.3°)

Xmax決定精度 = 20 g/cm^2 (FD単眼: 60 g/cm^2)

TAハイブリッドのイベントレート: ~ 2000 イベント/年

TALE実験の今後

- 現在82台のSDで稼働しているため、全103台稼働に向けてエレクトロニクスをインストールし、さらにより低エネルギー側の宇宙線を観測するために現在のTALEアレイよりも内側に57台のSDの設置を計画中です。



まとめ

- ・TALE (TA Low energy Extension) は $10^{16.5}$ - $10^{18.5}$ eV 領域の宇宙線を観測

- ✓ エネルギースペクトルを測定

- ✓ 2018年9月よりハイブリッド観測が行われおり、今後ハイブリッド解析をしていき 2nd knee ($\sim 2 \times 10^{17}$ eV) 領域の一次宇宙線の質量組成を明らかにしていく。



TALEサイト内で牛の骨が落ちていました

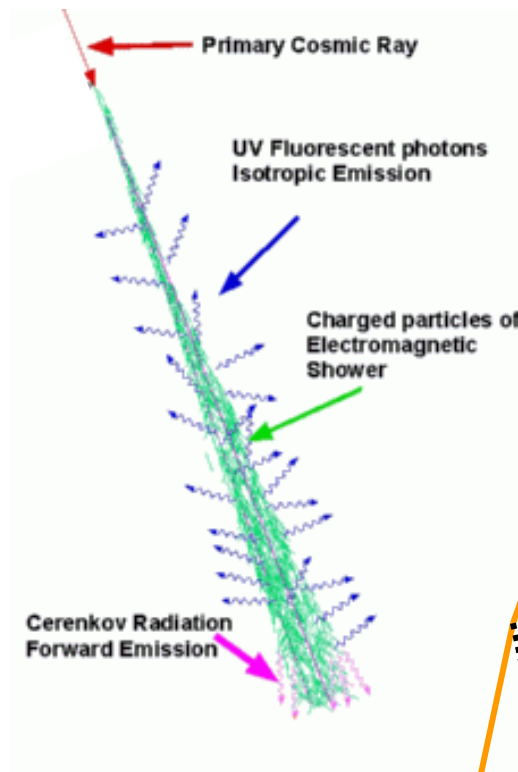


タワーからの一枚



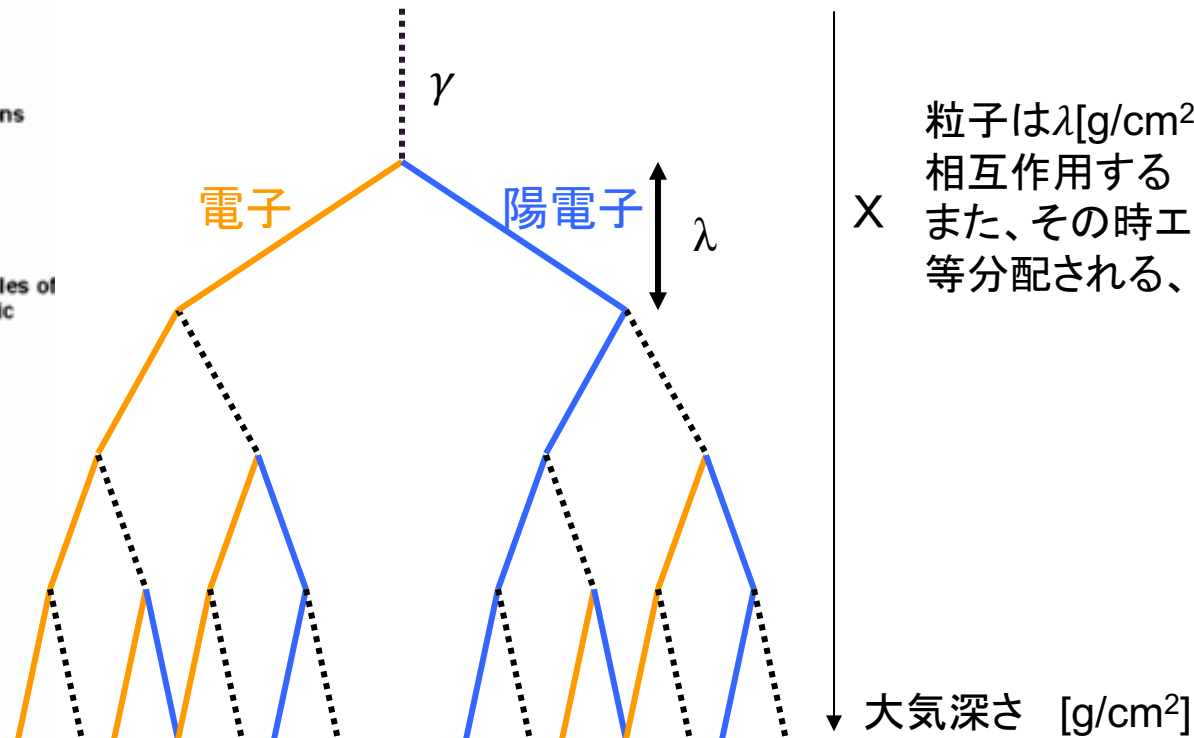
ばっくあっぷ

空気シャワー現象



エネルギー E_0 の陽子

$$\begin{cases} \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \\ \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^0 \rightarrow 2\gamma \end{cases}$$



粒子は $\lambda[\text{g}/\text{cm}^2]$ 進めば
相互作用する
また、その時エネルギーは
等分配される、と仮定

$N(X) = 2^{X/\lambda}$: 大気深さ $X \text{ g}/\text{cm}^2$ での粒子数

$$E(X) = E_0 / N(X)$$

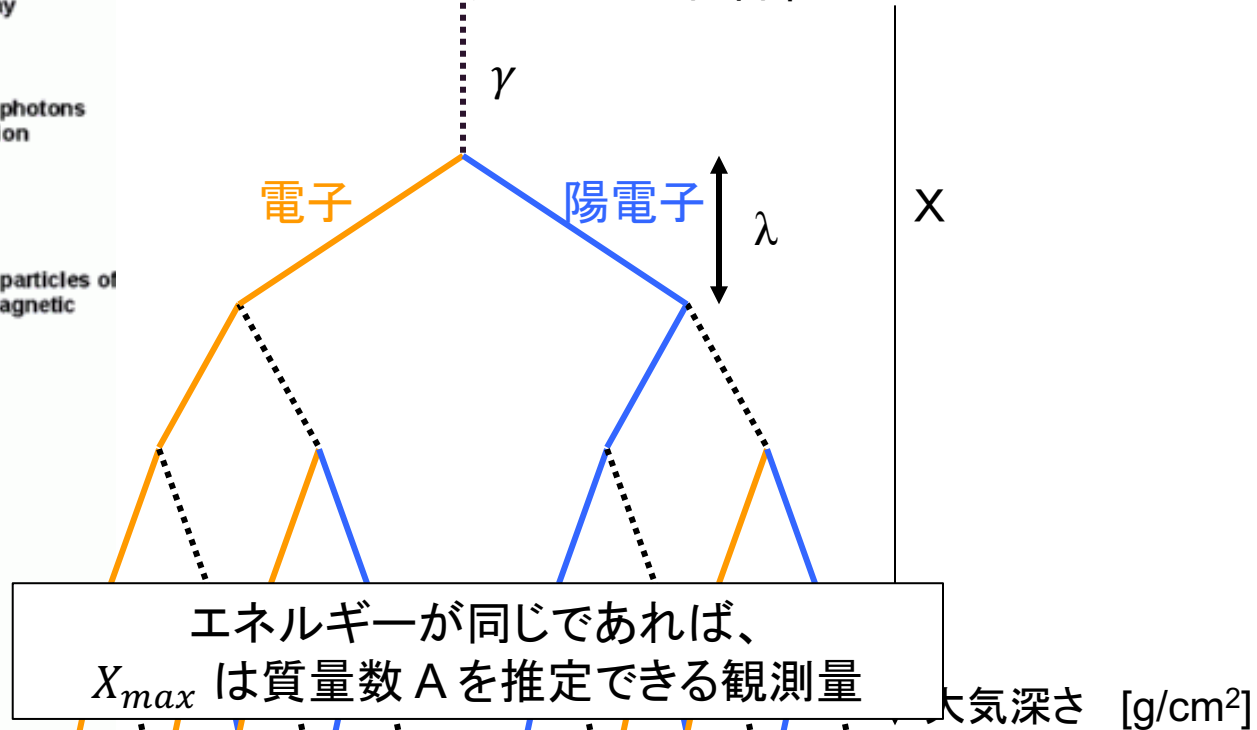
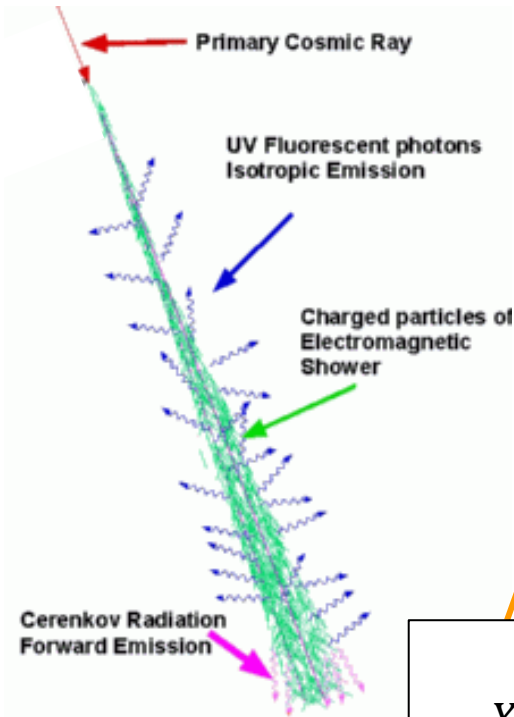
E_c : 粒子増加できる限界のエネルギーとし、その時の大気深さを X_{max} とすれば

$$N(X_{max}) = 2^{X_{max}/\lambda} = E_0 / E_c \Leftrightarrow X_{max} = \frac{\lambda \cdot \ln(E_0 / E_c)}{\ln 2}$$

空気シャワー現象

エネルギー E_0 , 質量数 A の原子核

→ E_0/A のエネルギーを持つ A 個のシャワーの重ね合わせ



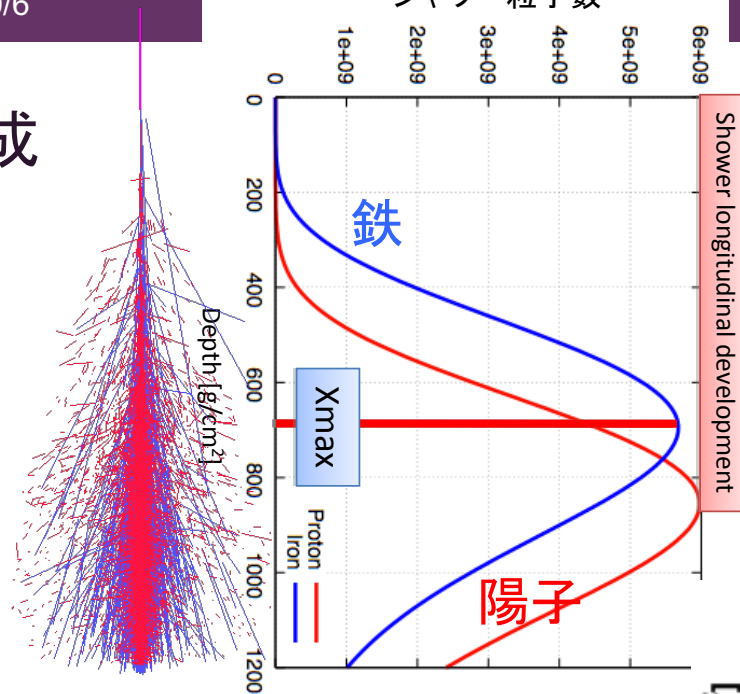
$N(X) = 2^{X/\lambda}$: 大気深さ X g/cm² での粒子数

$$E(X) = \frac{E_0}{A} / N(X)$$

E_c : 粒子増加できる限界のエネルギーとし、その時の大気深さを X_{max} とすれば

$$N(X_{max}) = 2^{X_{max}/\lambda} = \frac{E_0}{A} / E_c \Leftrightarrow X_{max} = \frac{\lambda \cdot \ln(E_0/E_c)}{\ln 2} - \frac{\lambda \cdot \ln A}{\ln 2}$$

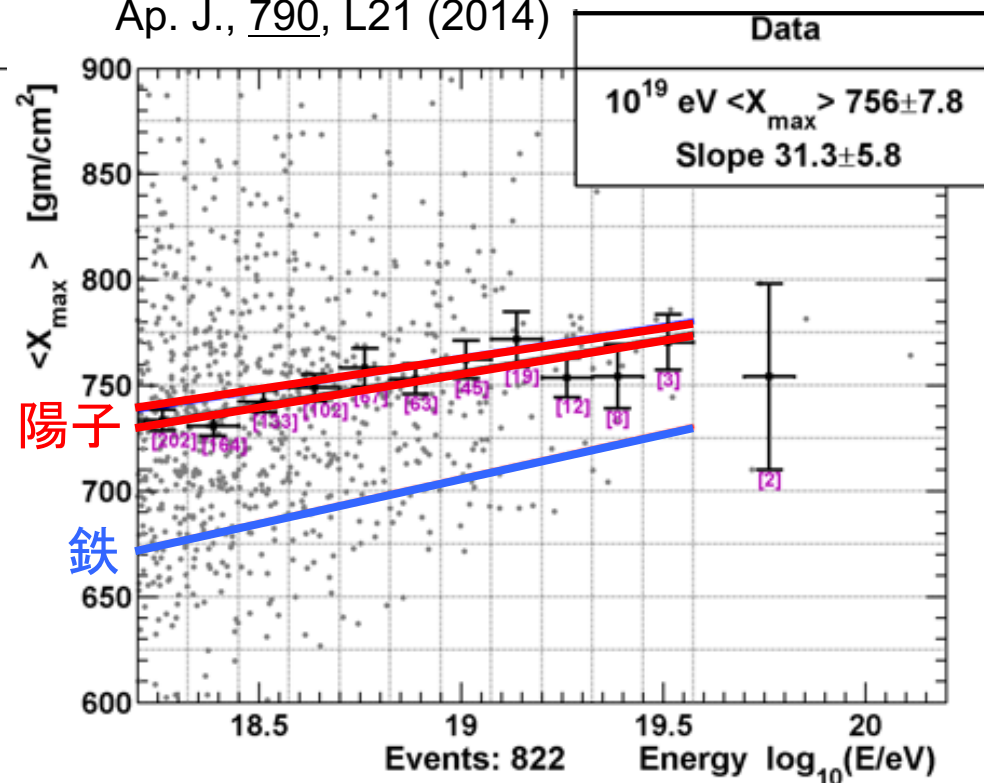
化学組成



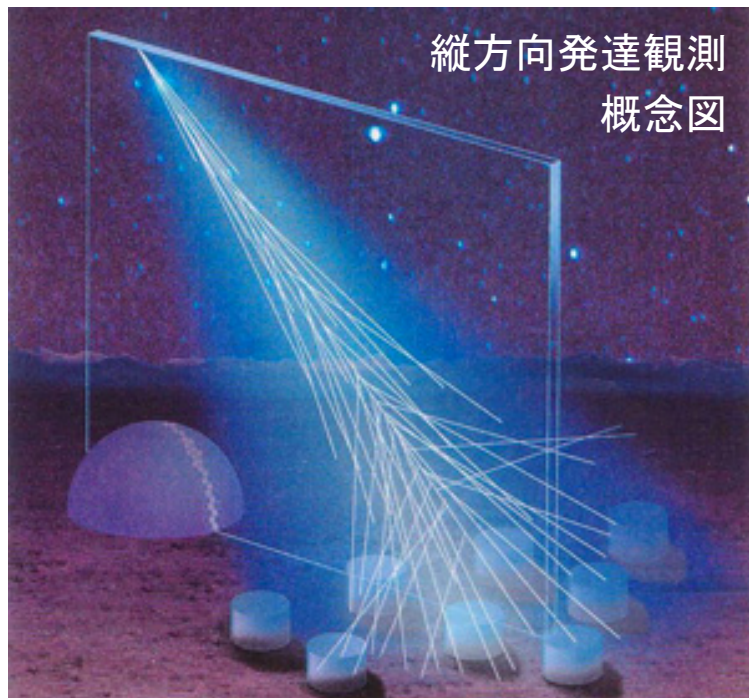
化学組成の測定:
大気蛍光望遠鏡＋地表検出器
＝ハイブリッド観測

組成は100%陽子と矛盾はない
ホットスポットの組成は不明
(事象統計量が少なすぎる)

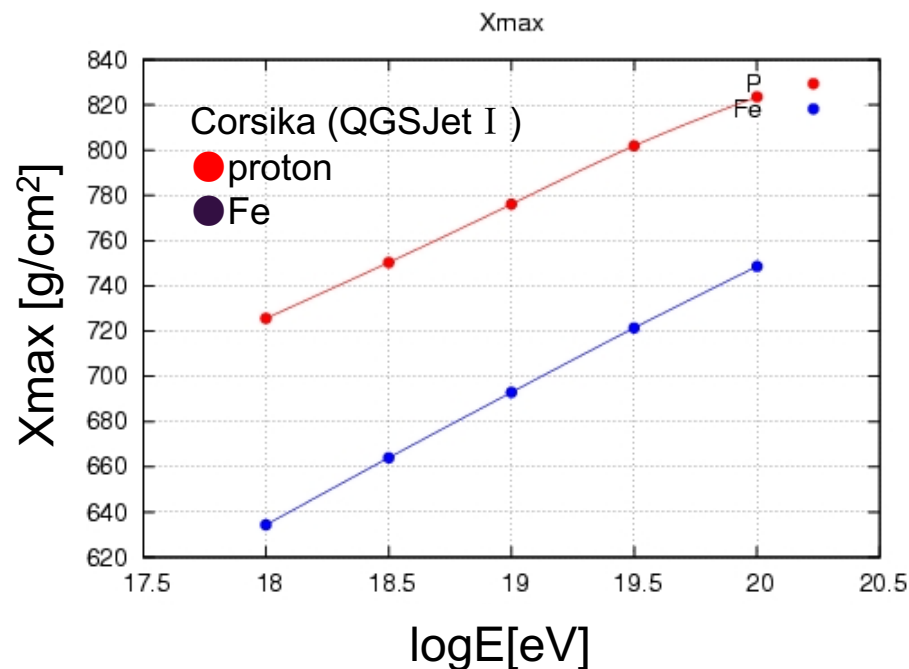
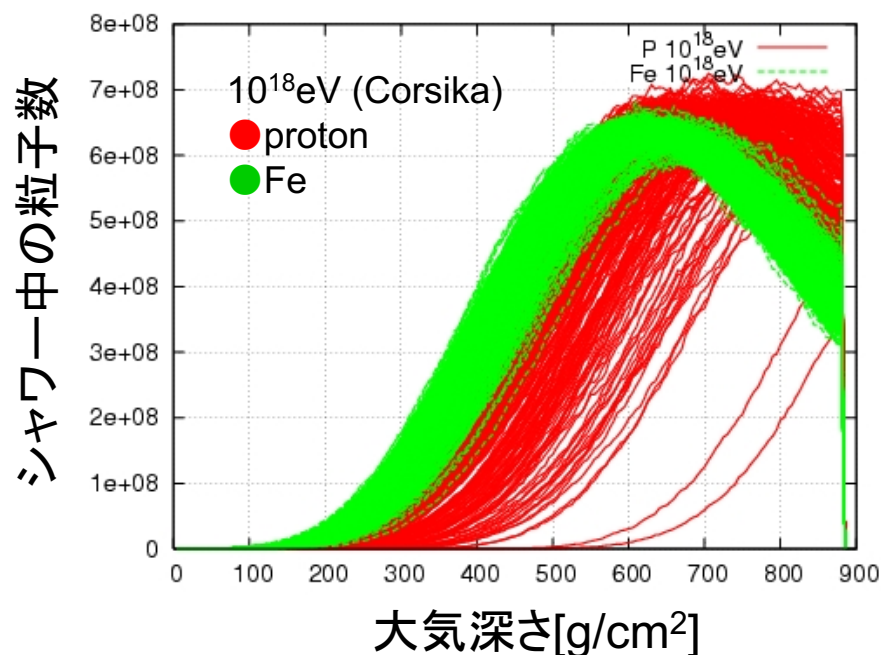
Ap. J., 790, L21 (2014)



縦方向発達観測
概念図



化学組成と空気シャワーの縦方向発達の関係



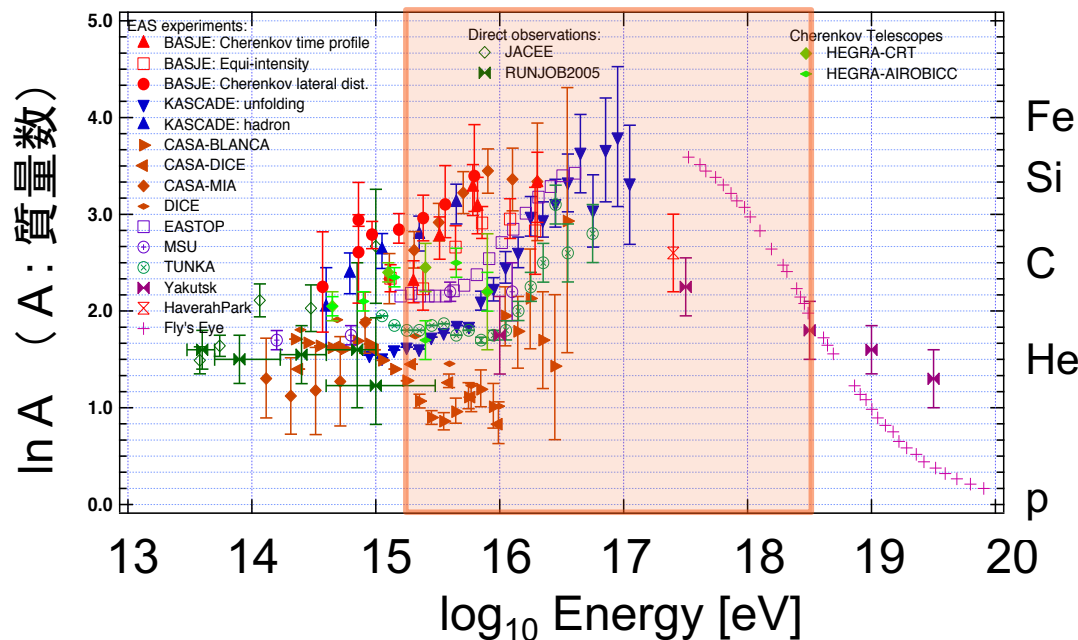
粒子数が最大になる深さ=Xmax、 $N_{\max} \sim E$ in GeVという関係

$$N_e(E, X - X_1) = S_0 \frac{E}{\varepsilon} \exp\left(\frac{X_{\max}}{\lambda} - 1\right) \left(\frac{X - X_1}{X_{\max} - \lambda}\right)^{\frac{X_{\max}}{\lambda} - 1} \exp\left(-\frac{X - X_1}{\lambda}\right)$$

X_1 : first interaction point, $X_{\max}$: depth of the maximum development point

ε : critical energy in air, 74 MeV, λ : attenuation length, 70 g/cm²

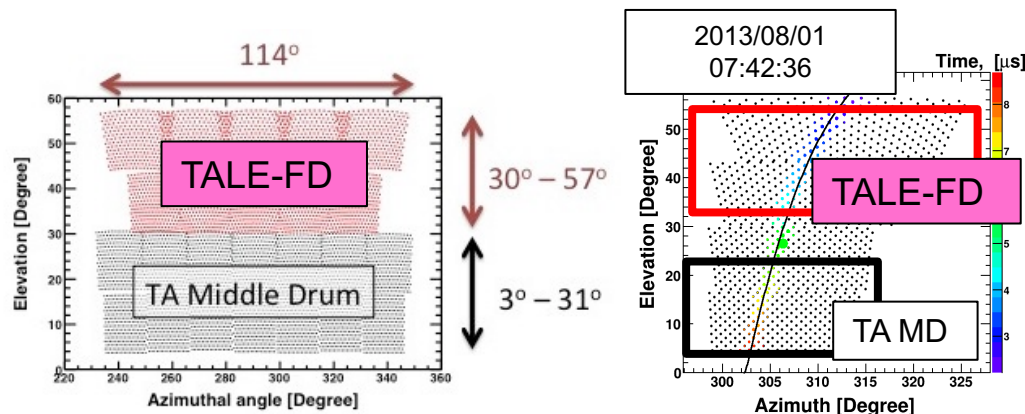
宇宙線の質量組成とエネルギーの関係



- ・Ankleより大きいエネルギー($\log_{10} E > 19$)ではpure protonであると考えている。
- ・Knee($\log_{10} E \sim 15.5$)から2nd Knee($\log_{10} E \sim 17.3$)の間の質量組成は解明されていない

TALE-FD

Middle Drum station



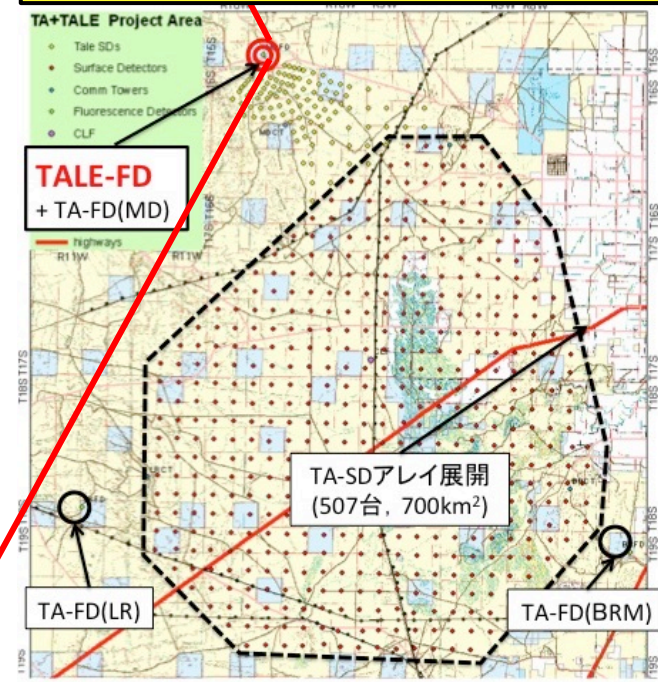
HiRes-FDs を再調整

鏡はMD-FDと同じ
エレクトロニクス : 8bits, 10MHz
FADC

TA実験のMiddle Drum
(MD) ステーションに隣接

望遠鏡10台
仰角: $31^\circ \sim 57^\circ$
方位角視野: 114°

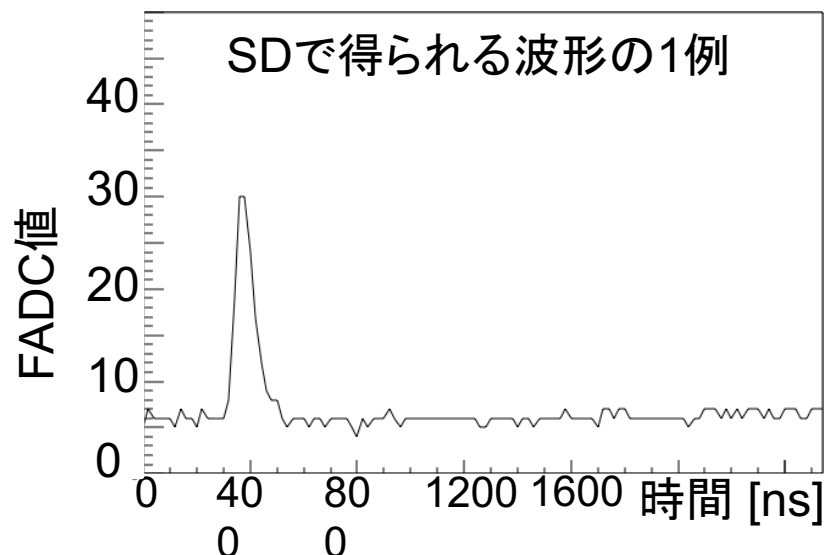
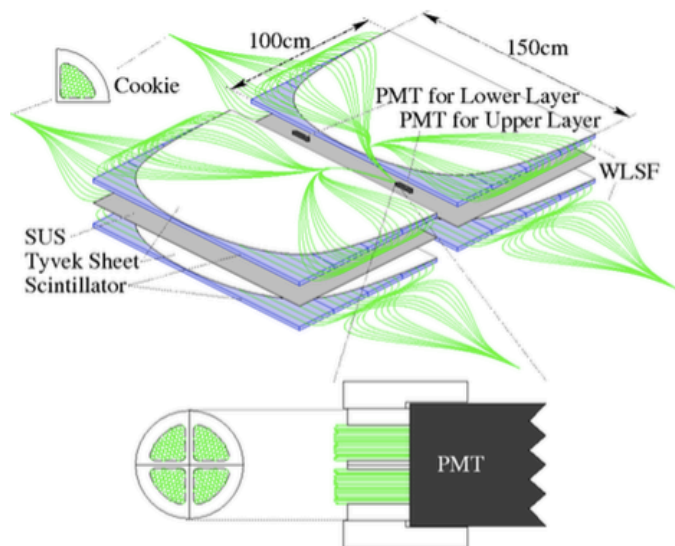
2012年11月に設置
2013年9月から定常観測



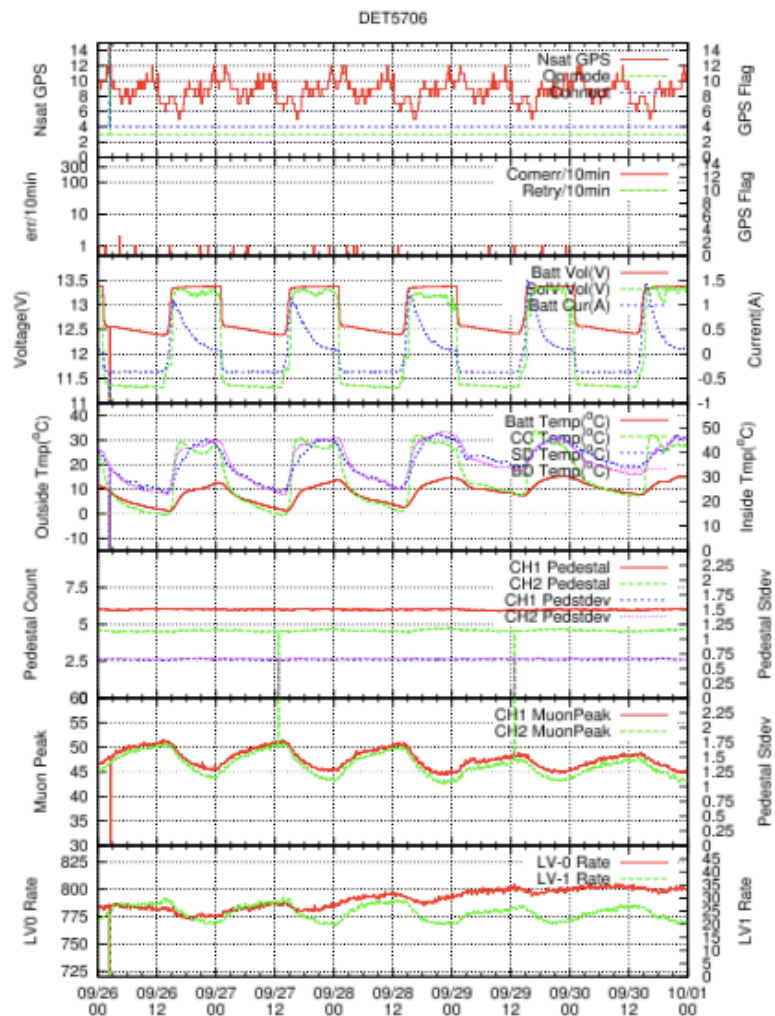
地表検出器 (Surface Detector, SD)



- プラスチックシンチレータ上下2層
3 m² × 1.2 cm × 2 層
- 各層ごとに光ファイバーで光電子増倍管 (PMT) へ集光
- SDでの流れ
 1. シンチレータが発光
 2. 光ファイバーでPMTへ集光
 3. PMTで電気信号へ変換
 4. FADCで信号をデジタル値に変換



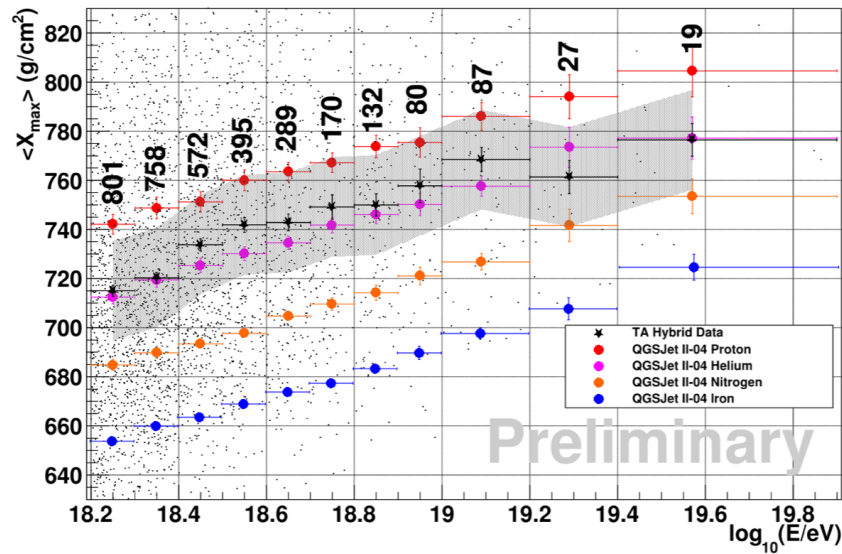
モニターデータ(SD)



0.3粒子相当以上の信号: 700 ~ 800 Hz

3粒子相当以上の信号 : 20 ~ 40 Hz

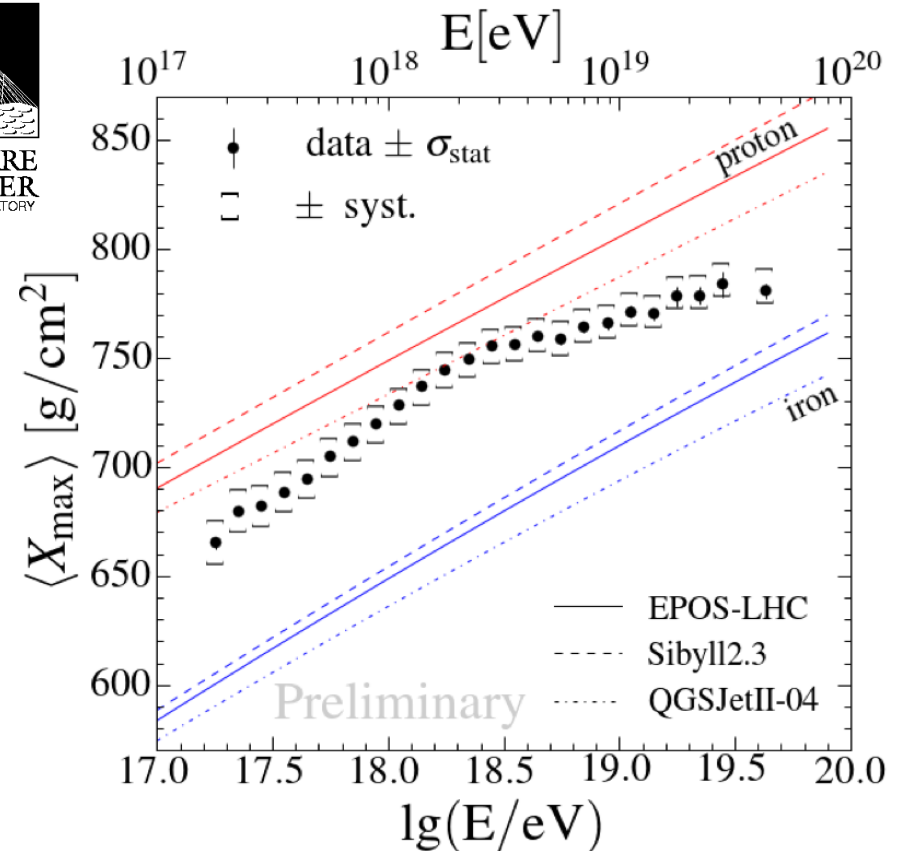
Mass composition (Average $X_{\max}$)



W. Hanlon et al., Proc. of ICRC 2017

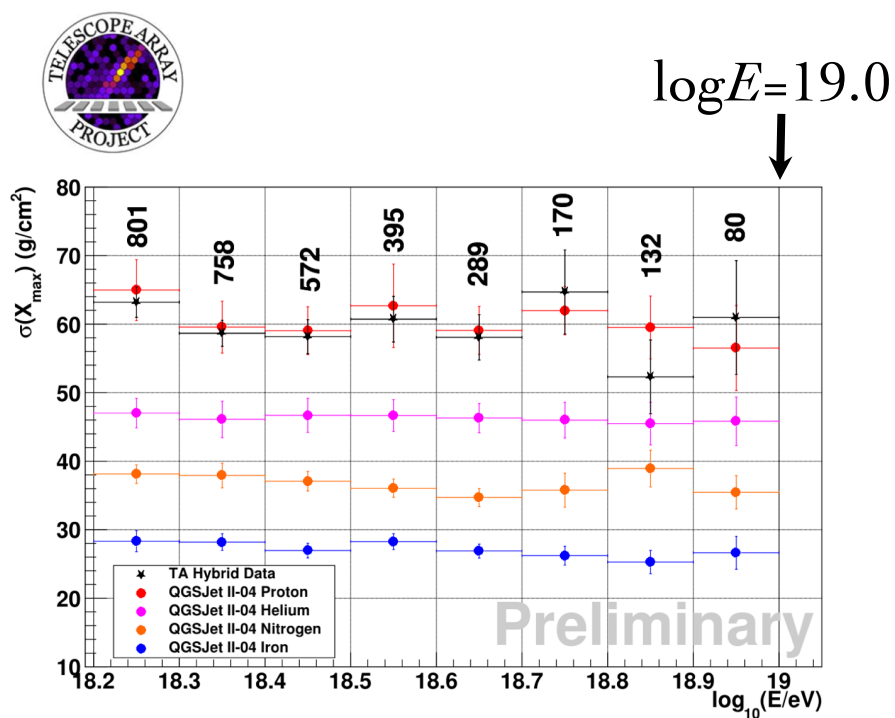


PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

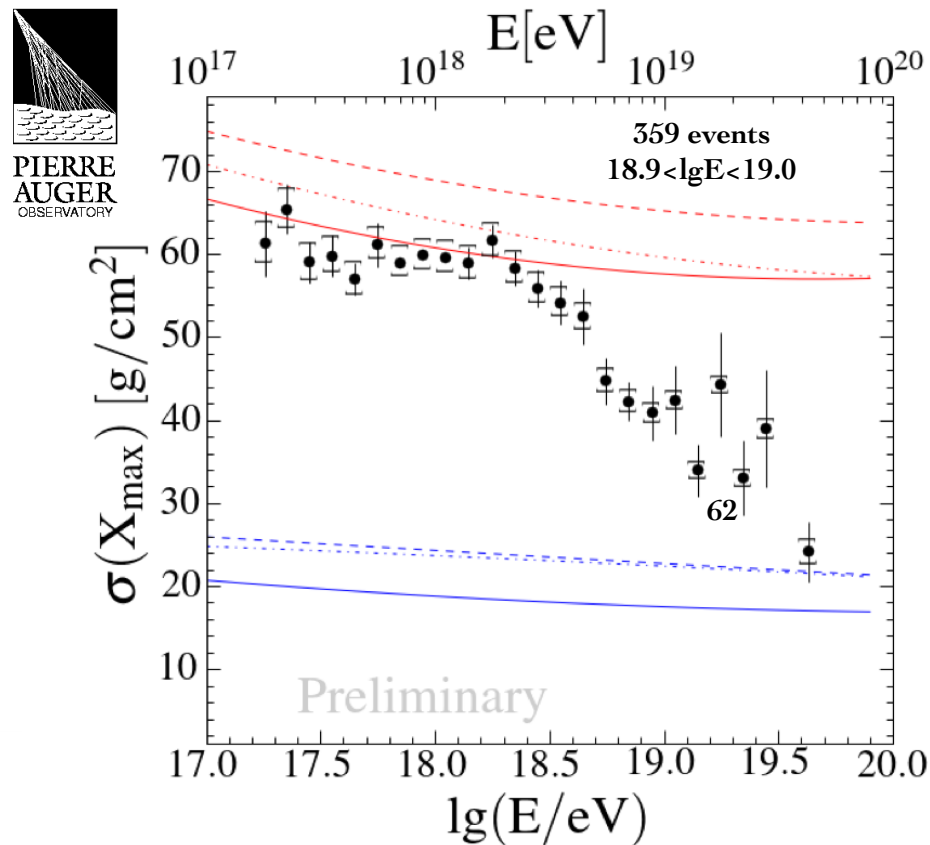


J. Bellido et al., Proc. of ICRC 2017

Mass composition ($X_{\max}$ distribution)



W. Hanlon in ICRC 2017



J. Bellido in ICRC 2017