



TALE実験の現状と今後

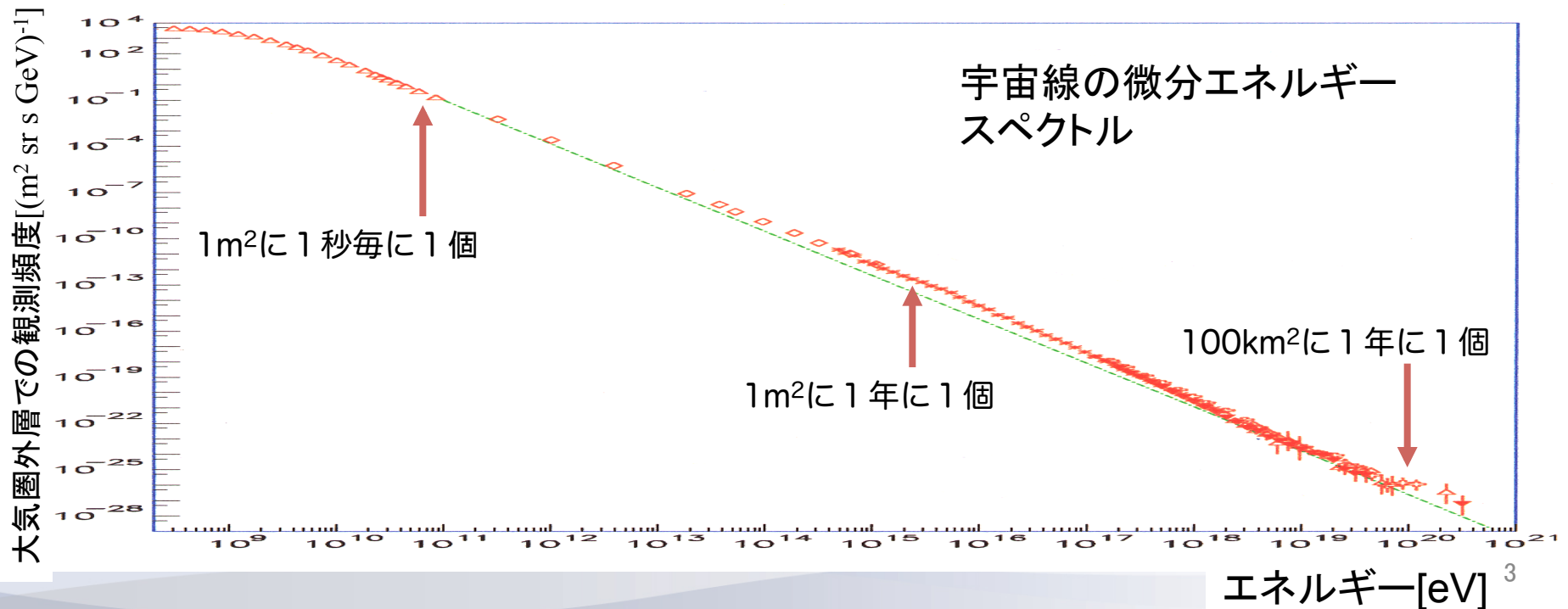
岸上翔一(大阪市立大学)

目次

1. 宇宙線とは
2. 宇宙線のエネルギースペクトルとその構造
3. TALE実験
4. まとめ・今後

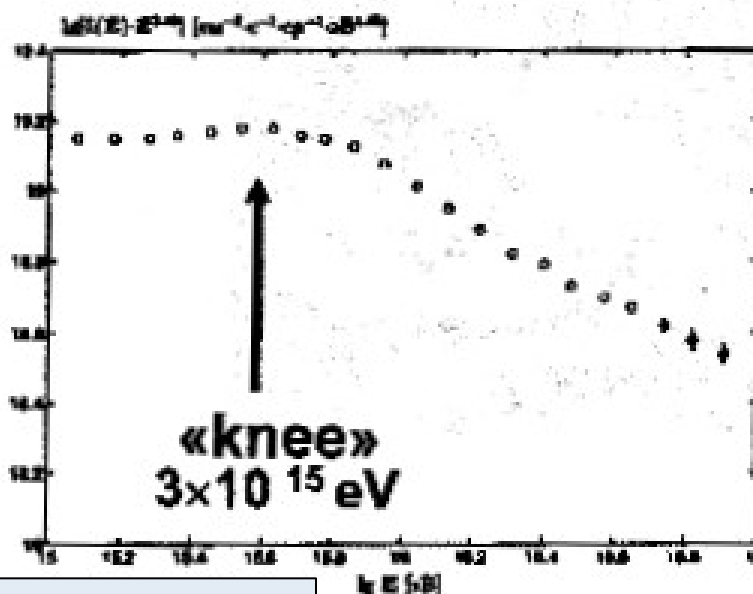
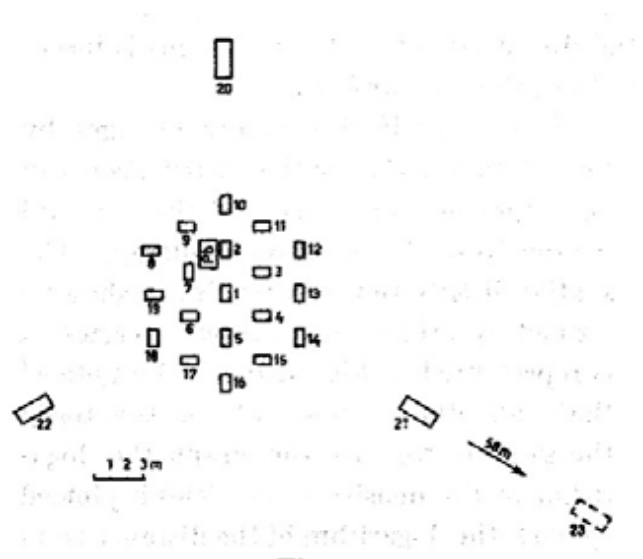
宇宙線とは

- 宇宙を飛び交う高エネルギー放射線
- 様々な実験で広いエネルギー範囲で観測
- 到来頻度はエネルギーのほぼ3乗に比例して小さくなる



折れ曲がり構造の発見

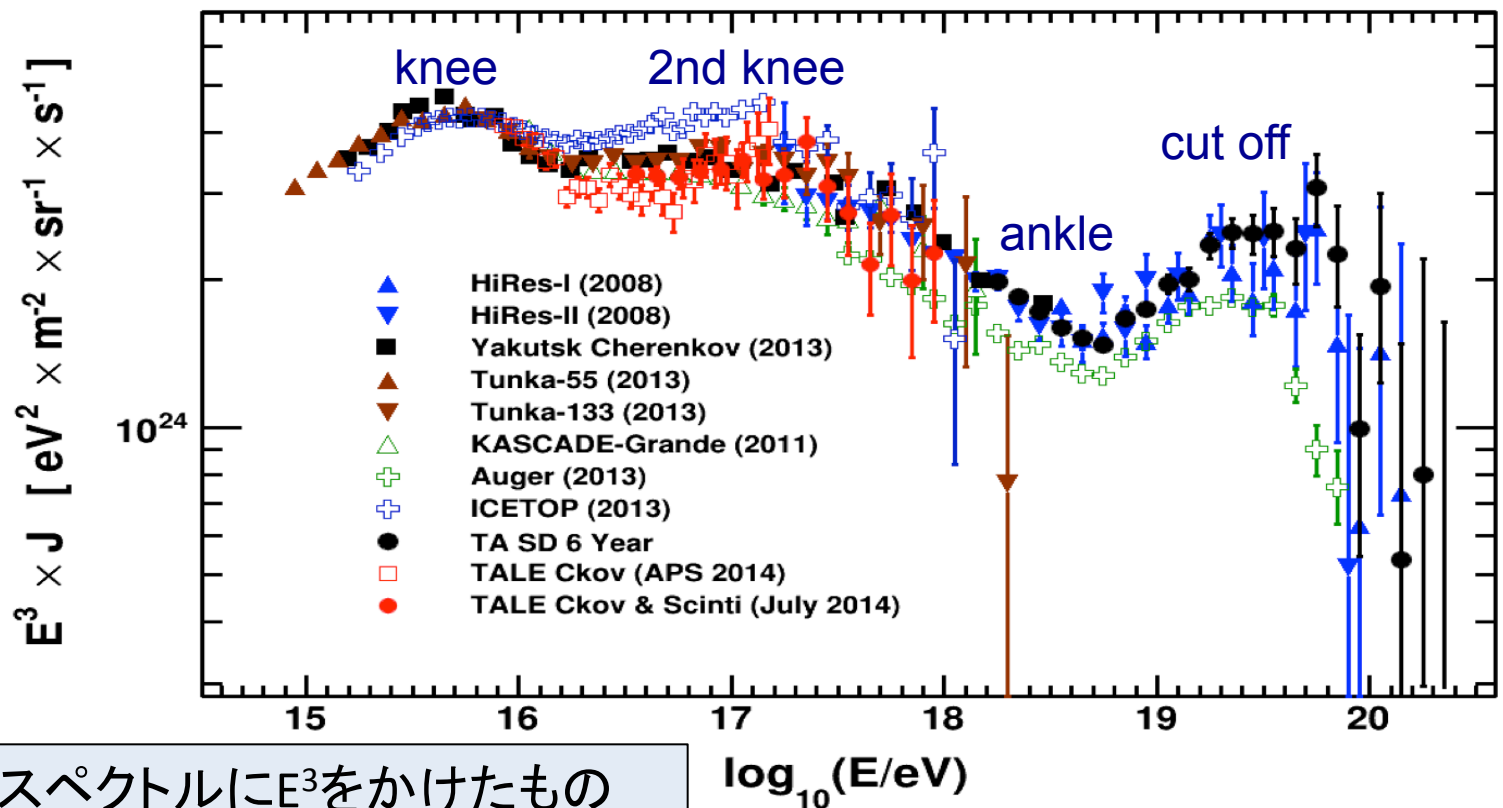
- パミール実験(1950～1954年、パミール山@中央アジア)
 - 1959年、G. B. Khristiansenがエネルギースペクトルに折れ曲がり構造があることを発表
 - この折れ曲がり構造の起源は何か？



パミール実験の配置図(1952年)とエネルギースペクトル

その他の折れ曲がり構造

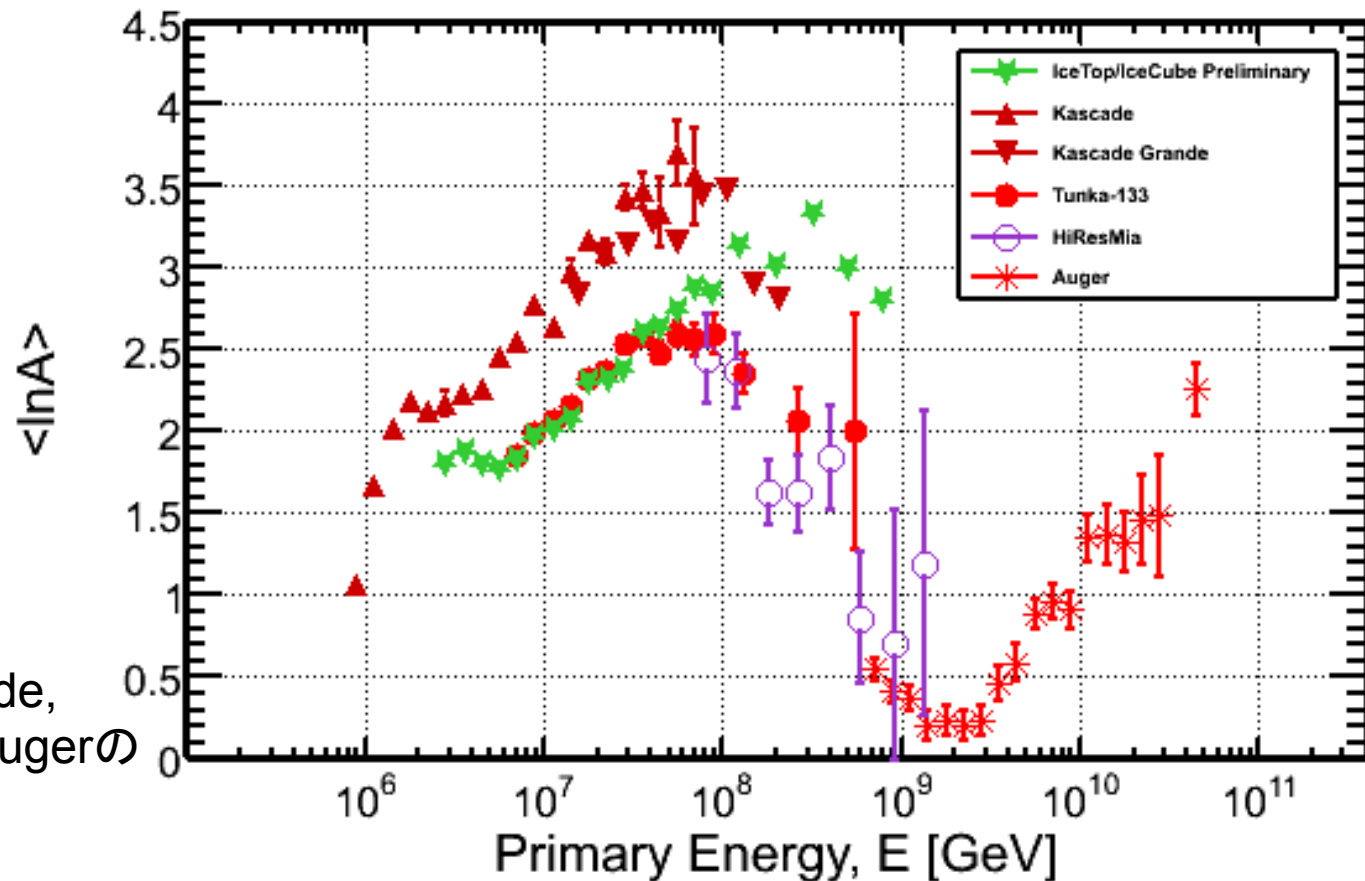
- その後、様々な実験により幾つかの折れ曲がり構造が見つかる
→それぞれ”knee”、”2nd knee”、”ankle”、”cut off”と呼ぶ



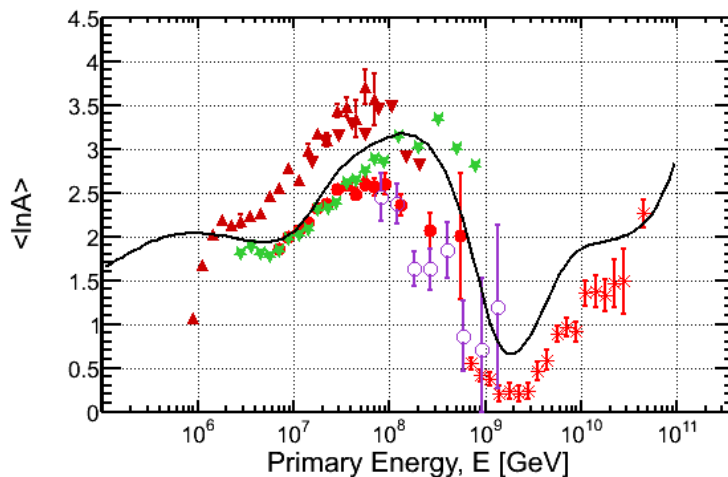
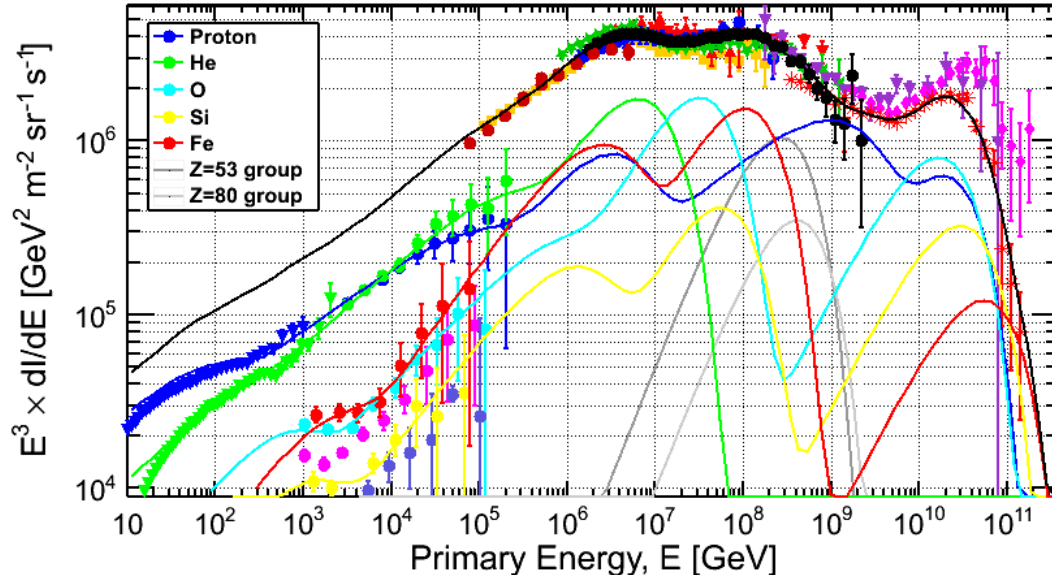
エネルギースペクトルに E^3 をかけたもの

宇宙線の質量組成

- 様々な実験で宇宙線の質量組成も測定されている

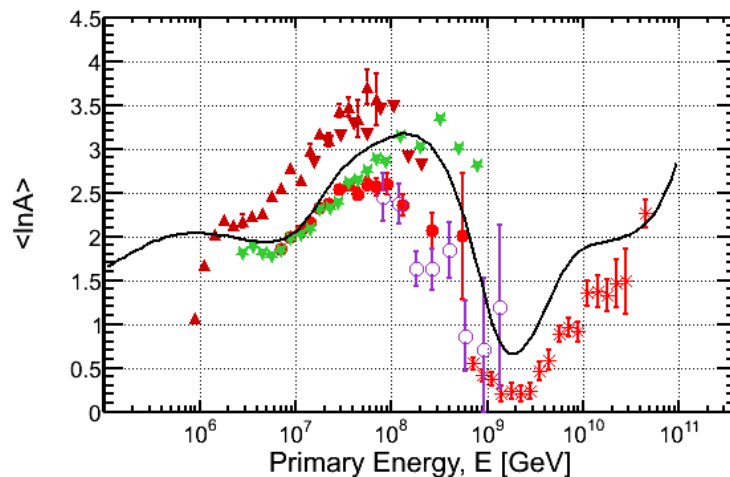
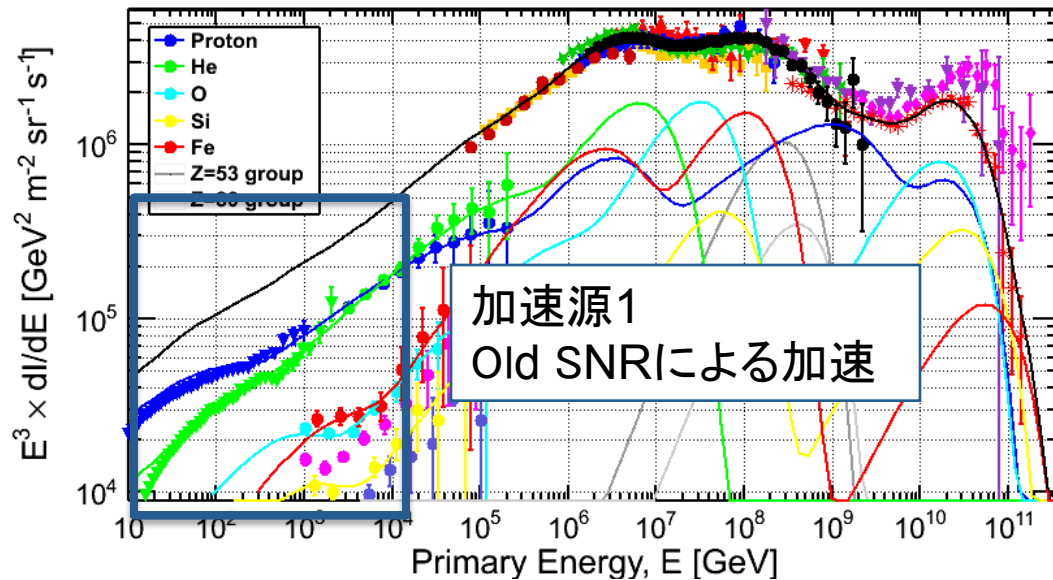


宇宙線の折れ曲がり構造のモデル



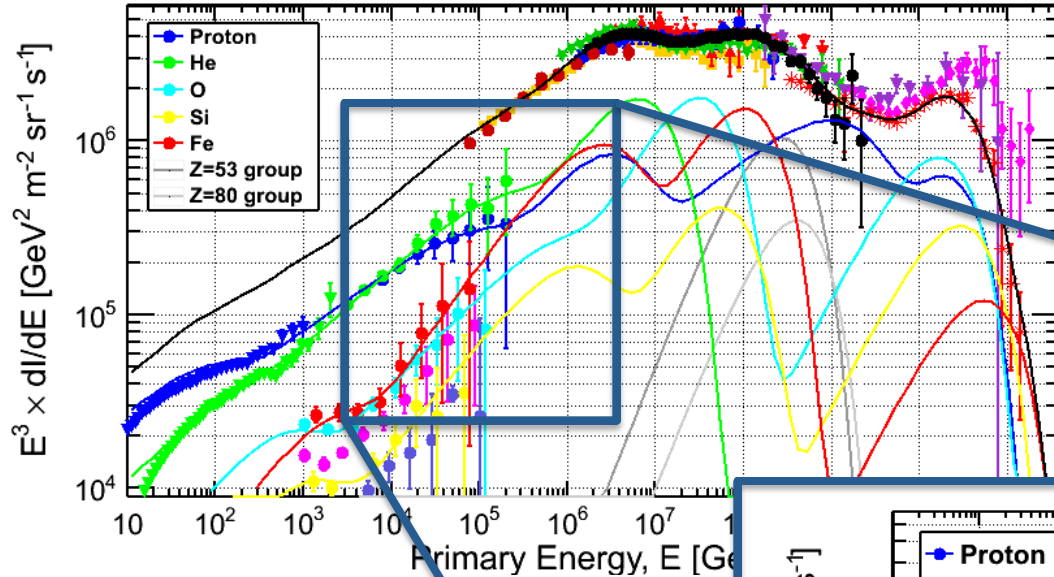
宇宙線のスペクトルを5つの加速源で説明するモデル
 (S. Tilav, UHECR2014)

宇宙線の折れ曲がり構造のモデル

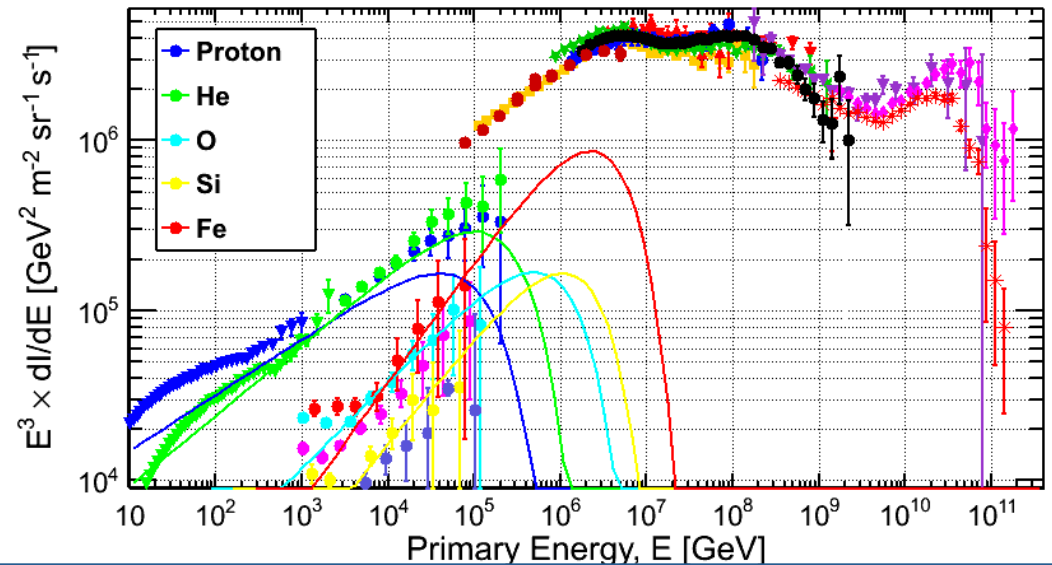
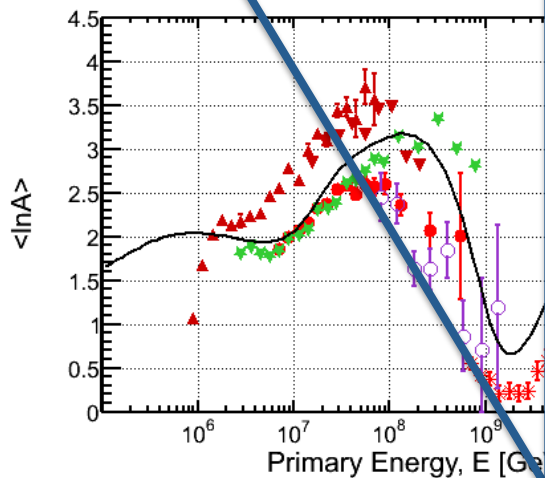


宇宙線のスペクトルを5つの加速源で説明するモデル (S. Tilav, UHECR2014)

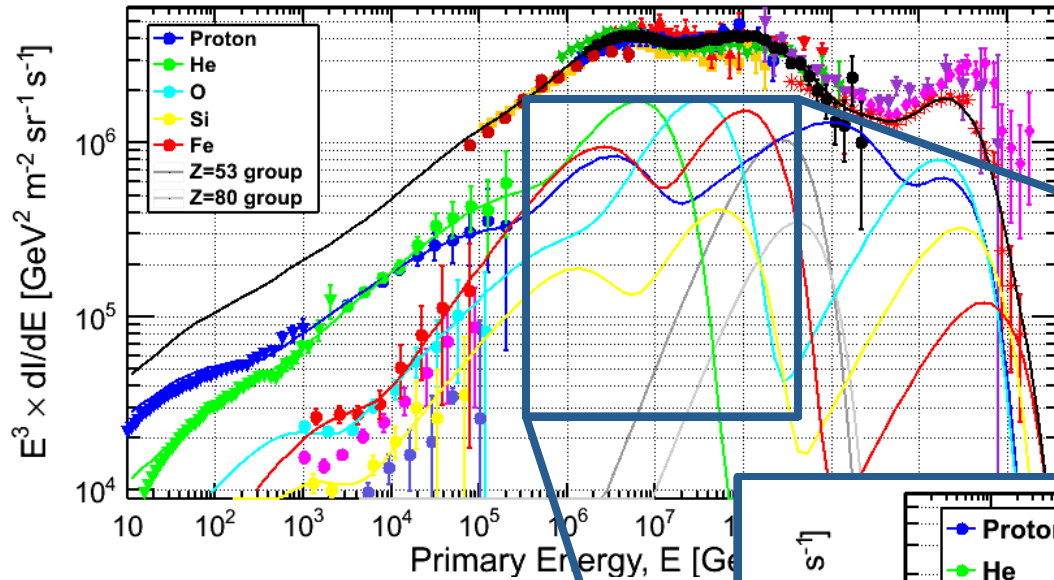
宇宙線の折れ曲がり構造のモデル



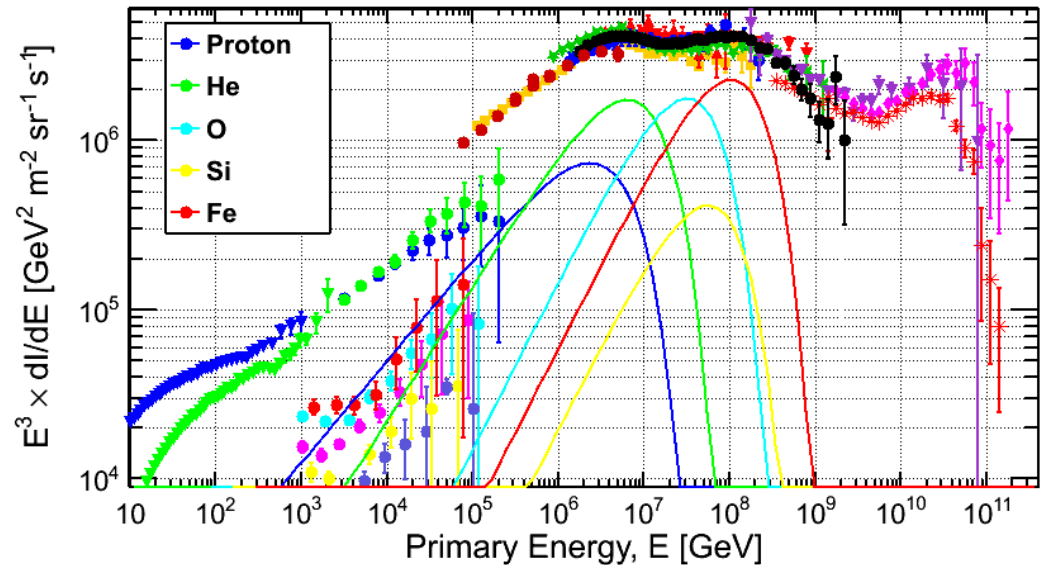
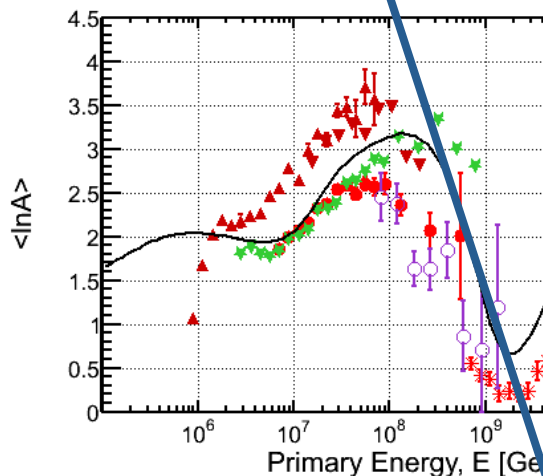
加速源2
 超新星による加速



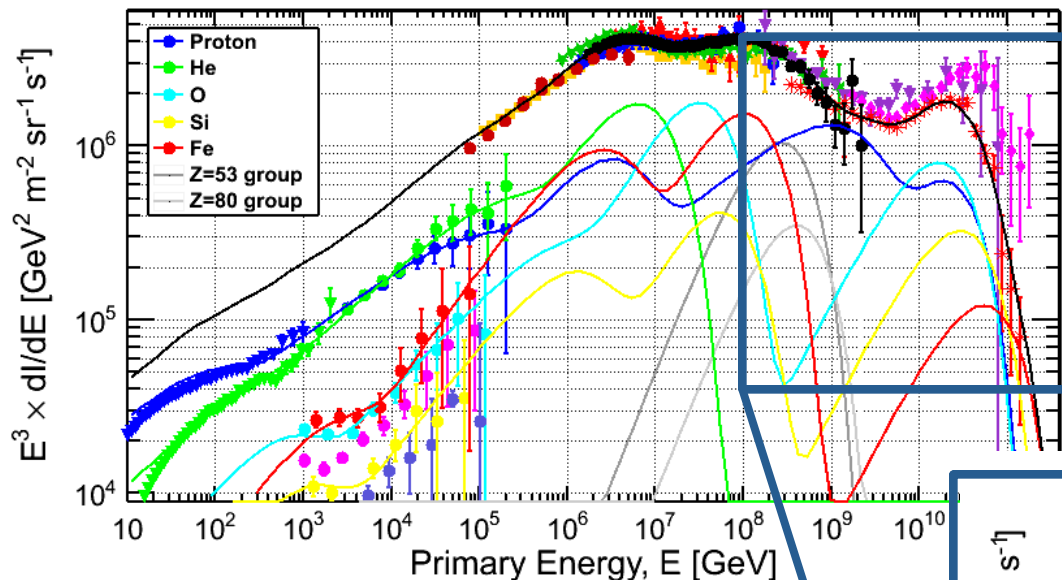
宇宙線の折れ曲がり構造のモデル



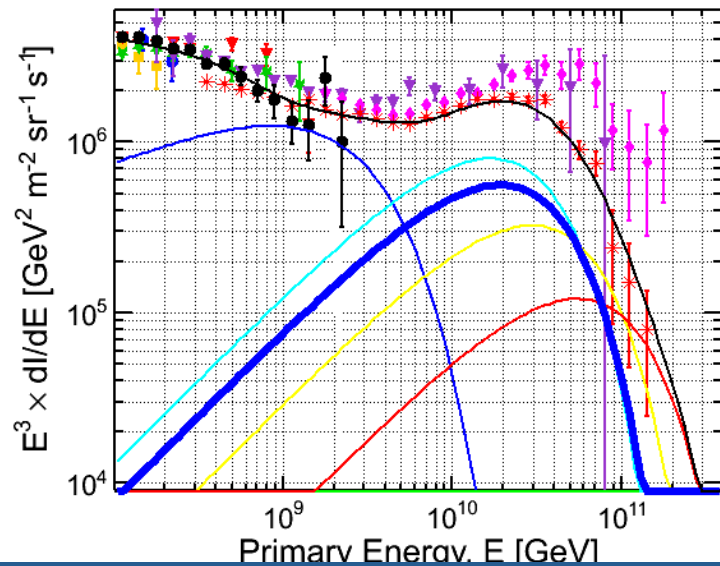
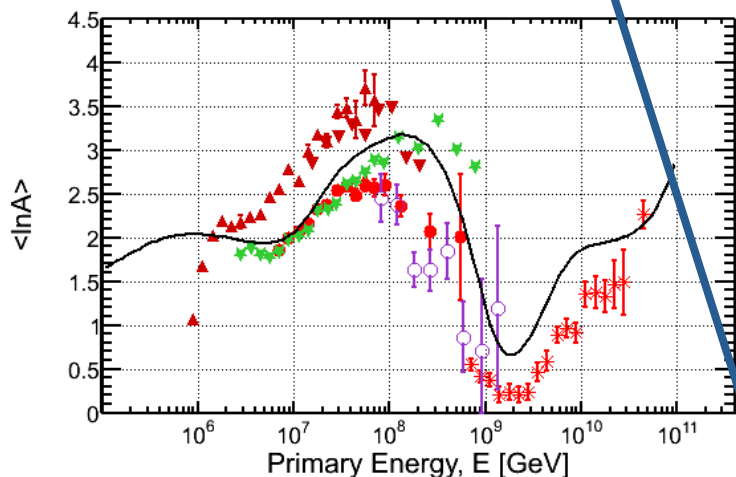
加速源3
 パルサー星雲による加速



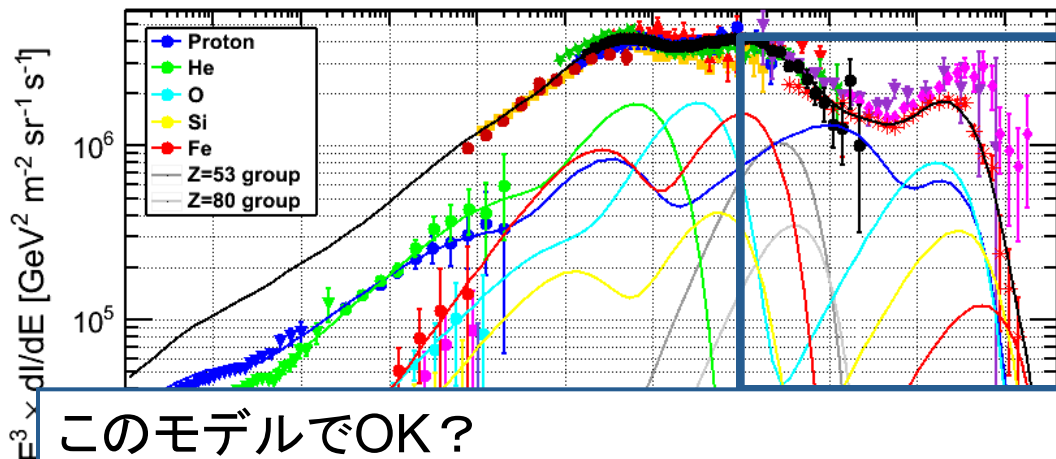
宇宙線の折れ曲がり構造のモデル



加速源4,5
 極超新星/GRB+銀河系外proton



宇宙線の折れ曲がり構造のモデル



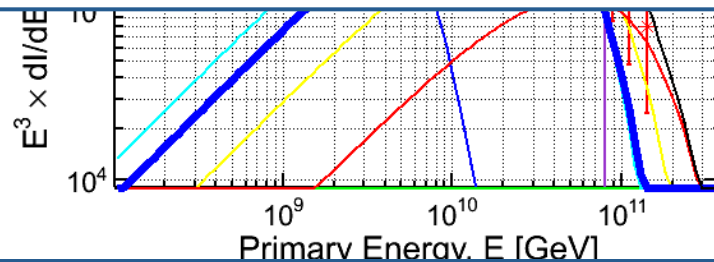
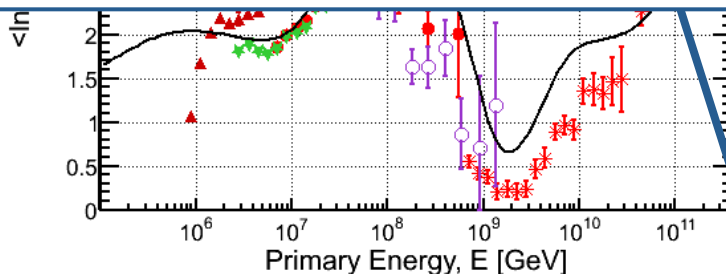
加速源4,5
極超新星/GRB+銀河系外proton

このモデルでOK?

->このモデルの核種ごとのスペクトルは全粒子のスペクトルに合うように作られたもの

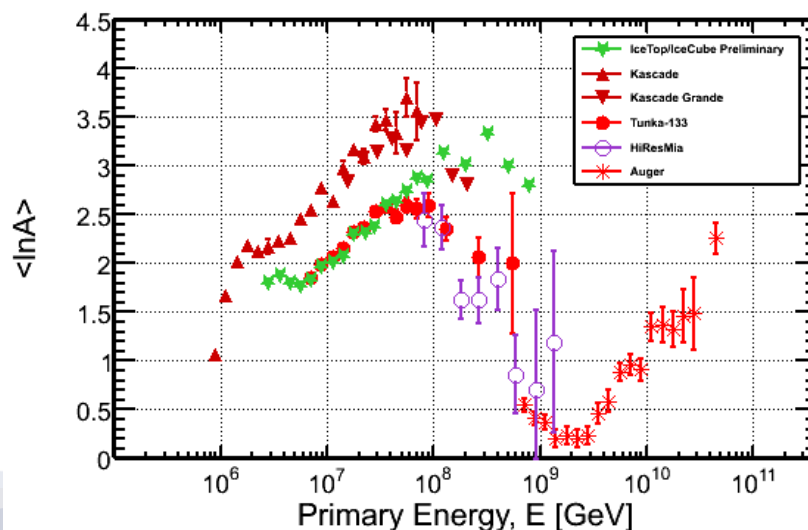
=加速源は同定されていないし、本当にこの割合で混ざっているかは全然わかっていない。

->なので、スペクトル・質量組成を精密に測定する必要がある。



宇宙線観測の課題

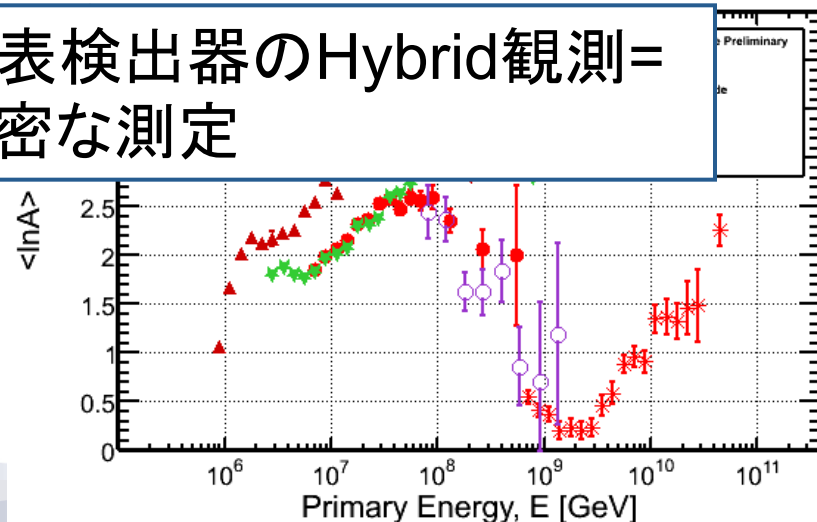
- KASCADE: ミューオン数から組成を決定
→ TA、Augerでミューオン数の過剰が報告されている
- IceTop: 南極での観測
→ 検出器を一定の状態に留めるのが難しい
- HiRes: 大気蛍光望遠鏡による単眼解析
→ 単眼だとシャワー軸を決めるのが難しい



宇宙線観測の課題

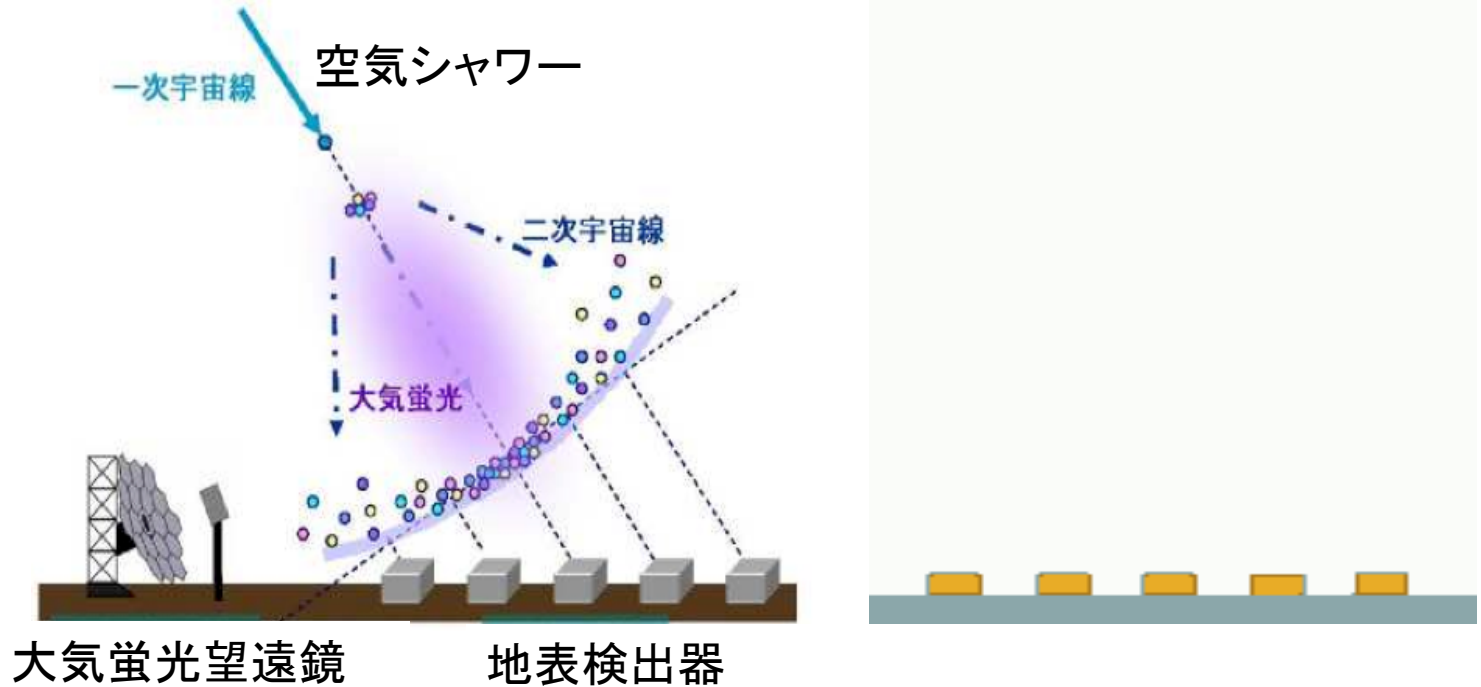
- KASCADE: ミューオン数から組成を決定
→ TA、Augerでミューオン数の過剰が報告されている
- IceTop: 南極での観測
→ 検出器を一定の状態に留めるのが難しい
- HiRes: 大気蛍光望遠鏡による単眼解析
→ 単眼だとシャワー軸を決めるのが難しい

大気蛍光望遠鏡と地表検出器のHybrid観測= 系統誤差の小さい精密な測定



大気蛍光望遠鏡 + 地表検出器 = Hybrid 観測

- 大気蛍光望遠鏡と地表検出器にはそれぞれ長所と短所がある
→組み合わせることにより精度の良い観測を実現



- 大気蛍光を観測
- エネルギー決定精度が良い



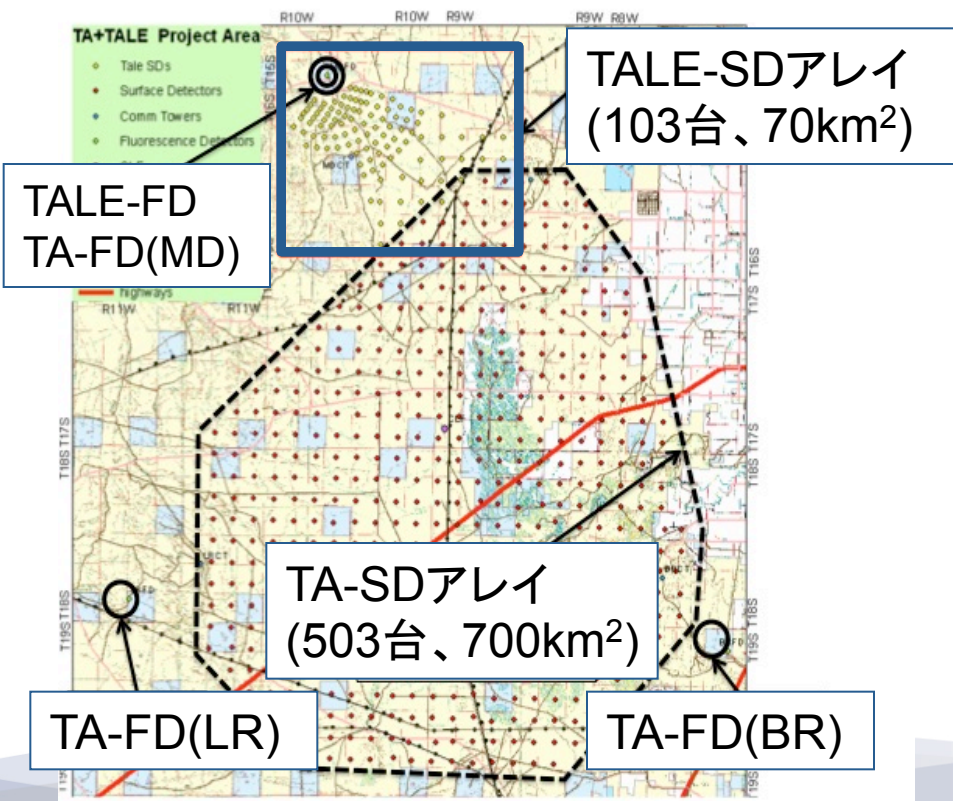
- 地表の粒子数を観測
- 方向決定精度が良い



組み合わせると精度の良い観測

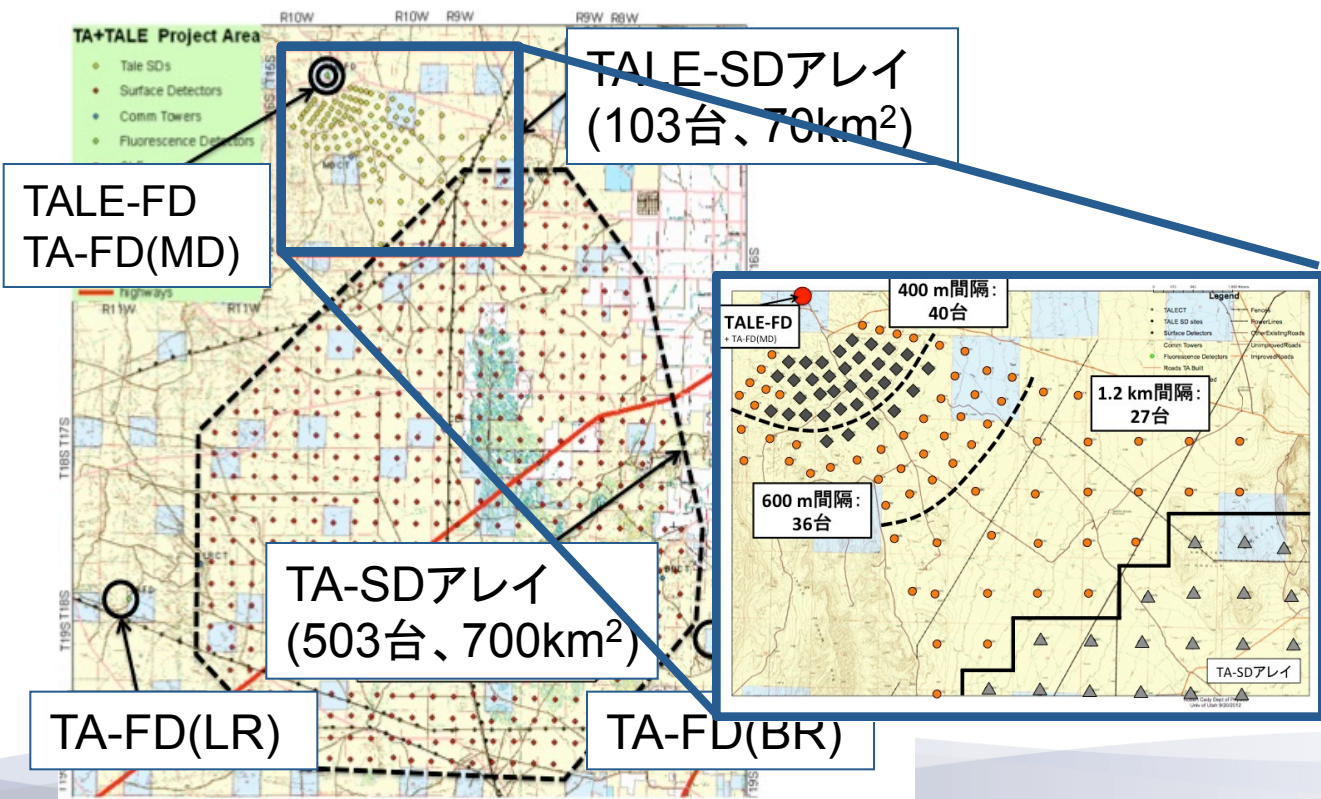
TA Low energy Extension 実験

- TALE(TA Low energy Extension実験)=TA実験の拡張実験
- 10台の大気蛍光望遠鏡(FD)+103台の地表検出器(SD)



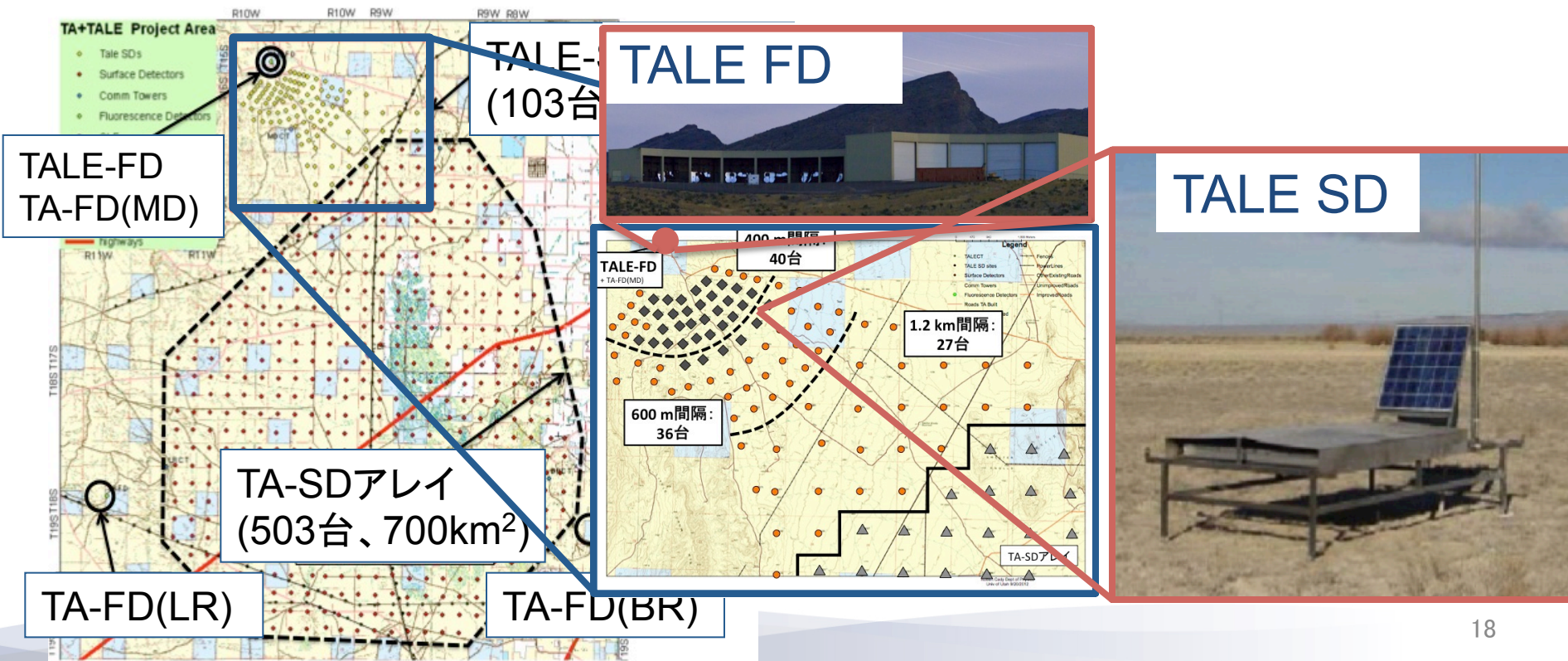
TA Low energy Extension 実験

- TALE(TA Low energy Extension 実験)=TA実験の拡張実験
- 10台の大気蛍光望遠鏡(FD)+103台の地表検出器(SD)

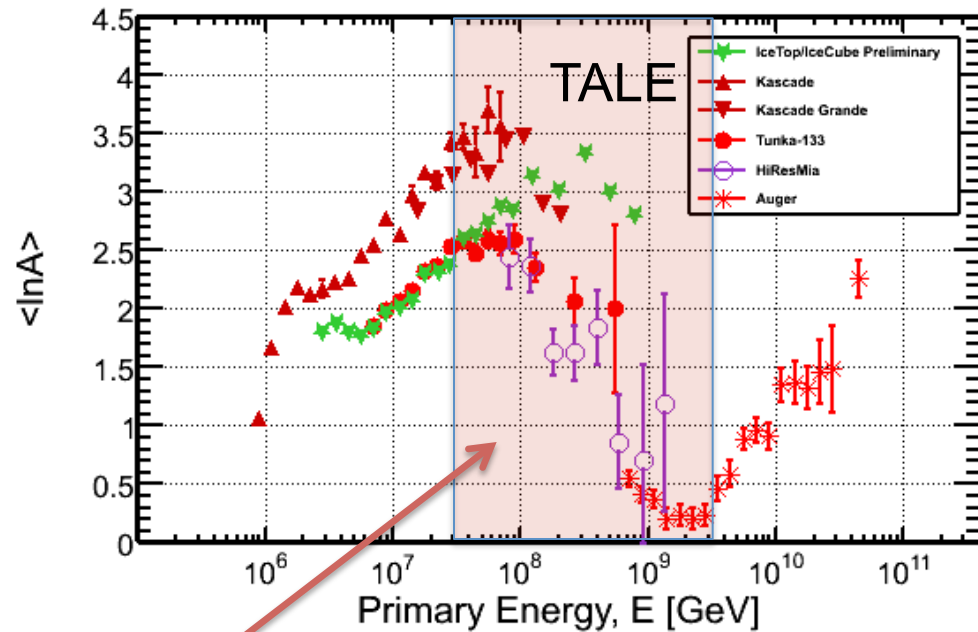
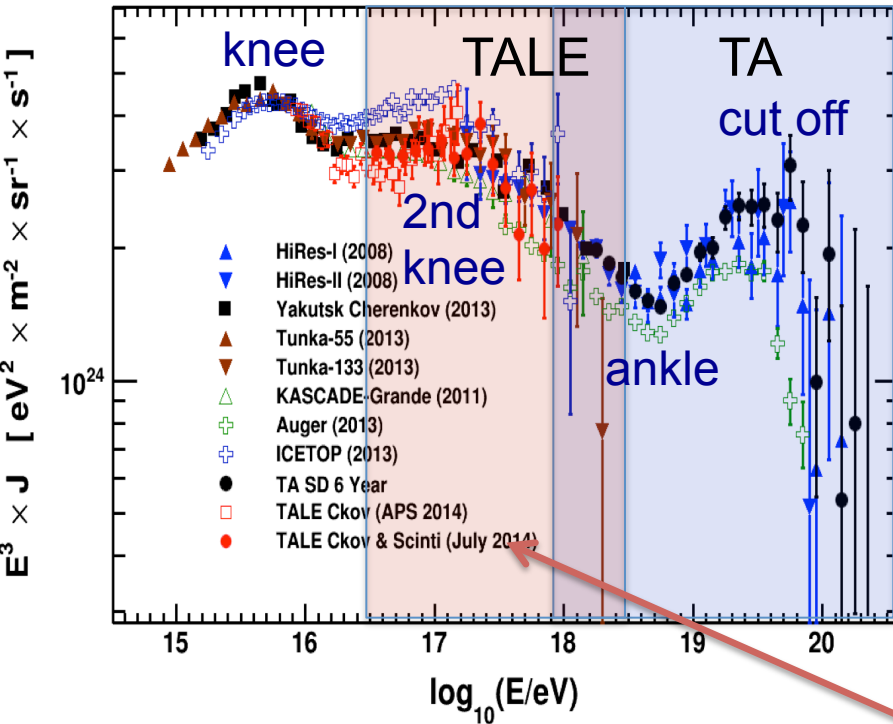


TA Low energy Extension 実験

- TALE(TA Low energy Extension 実験)=TA実験の拡張実験
- 10台の大気蛍光望遠鏡(FD)+103台の地表検出器(SD)



TALE実験の目的



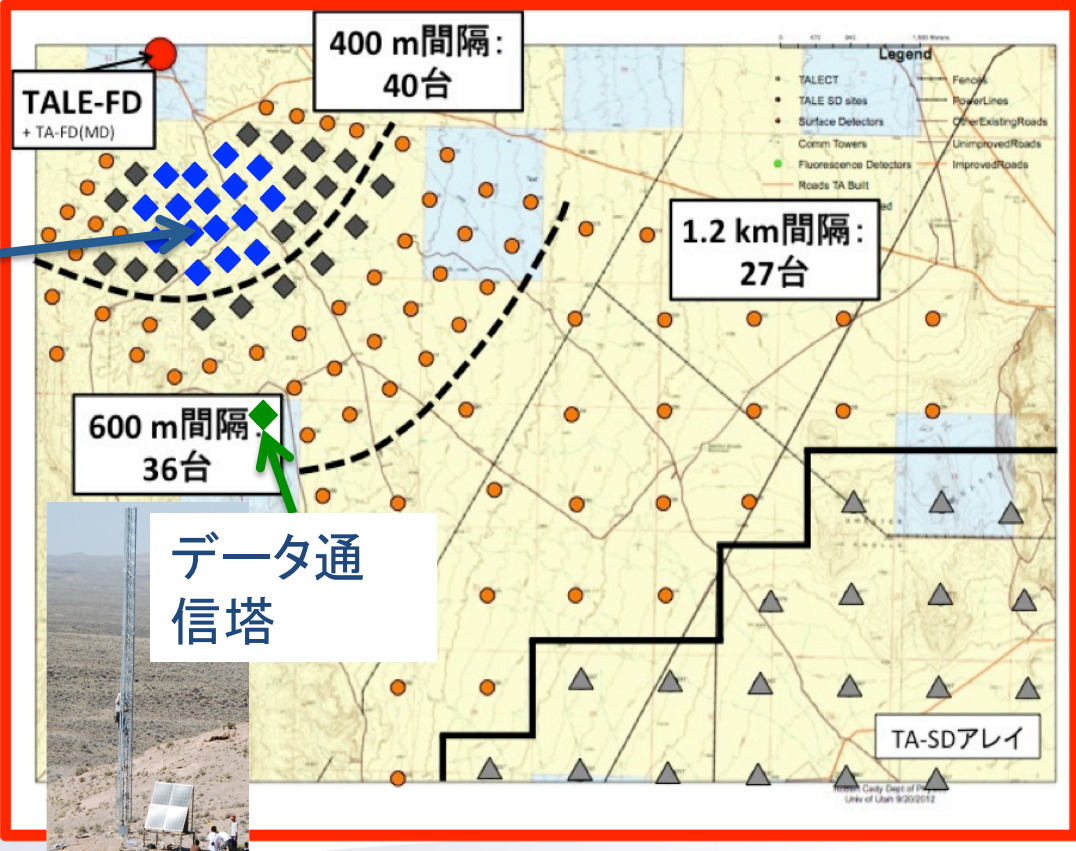
高密度の地表検出器+高仰角大気望遠鏡のハイブリッド測定
 →TAより低エネルギー側の宇宙線を精密に測定
 2nd knee領域のエネルギー・スペクトル・化学組成を明らかにする
 →2nd kneeの折れ曲がりの原因は何かを明らかにする

TALE SD

TALE実験SD: 80台(103台)
 35台設置: 2013年3月
 16台で観測: 2013年5月~
 残りの45台: 2018年度に設置する予定



TALE SD

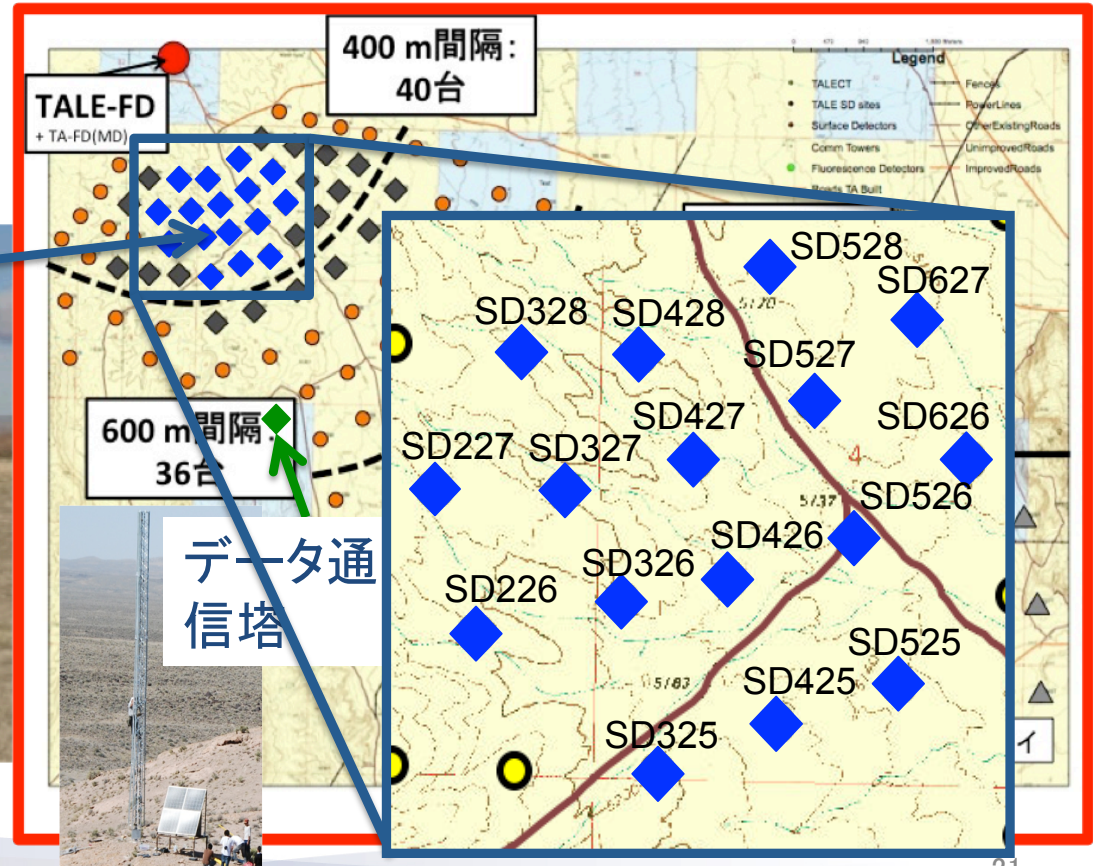


TALE SD

TALE実験SD: 80台(103台)
 35台設置: 2013年3月
 16台で観測: 2013年5月~
 残りの45台: 2018年度に設置する予定



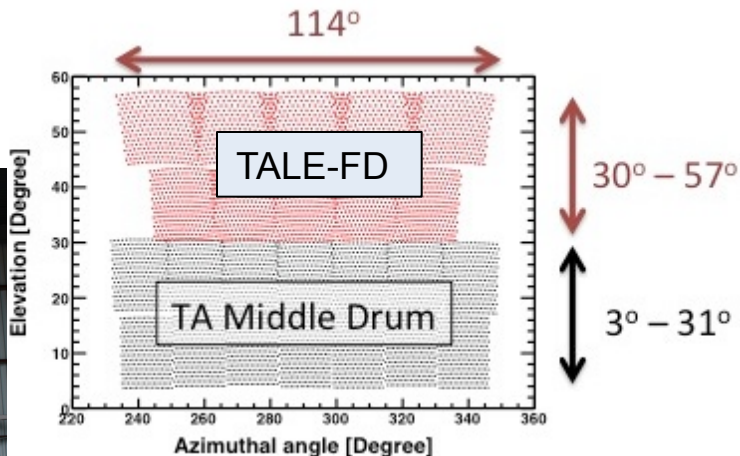
TALE SD



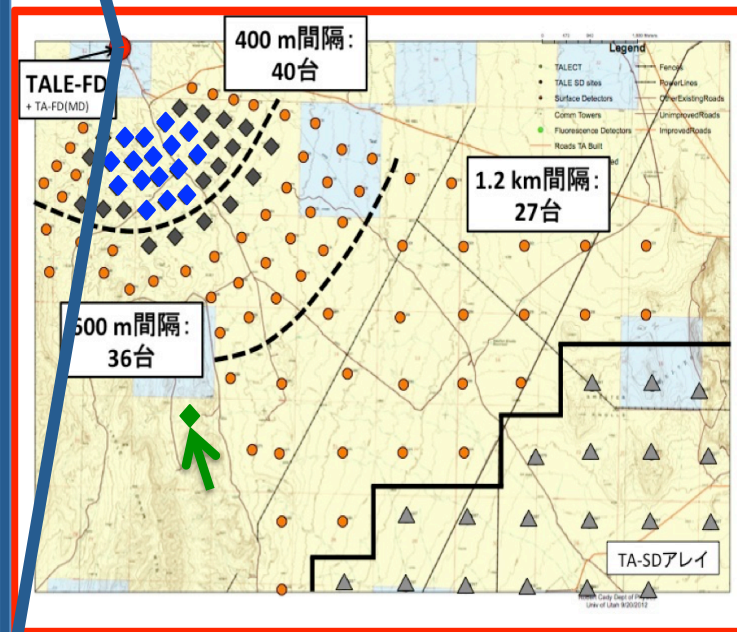
TALE FD



TALE実験FD: 10台
 仰角 30° ~ 57° 、方位角 114°
 設置: 2012年11月
 定常観測: 2013年9月~

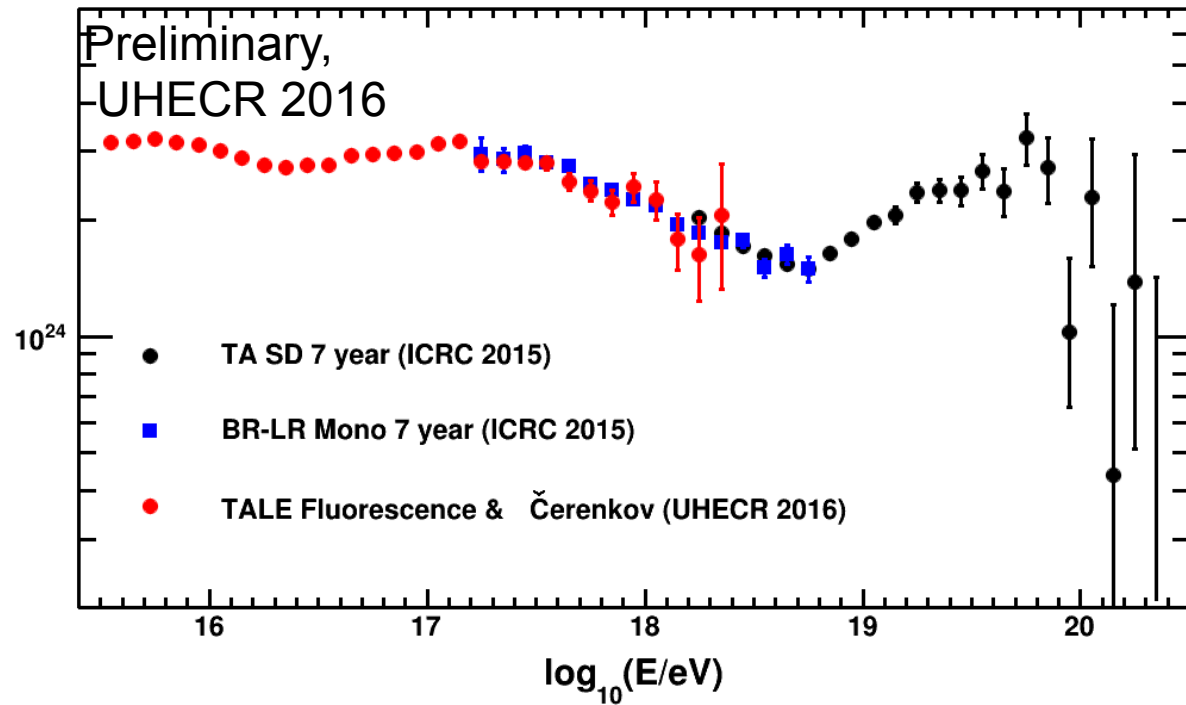
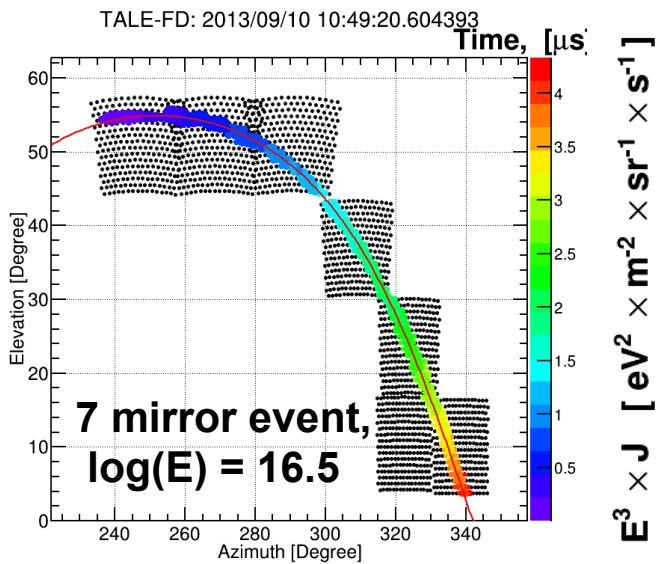


TA実験MDステーションに隣接
 HiRes実験(1993年~2006年)
 のFDシステムを改良して再利用



TALE FDの結果

TALE FDのイベントディスプレイと
エネルギースペクトル



まとめ・今後

1. 宇宙線

- エネルギースペクトルに折れ曲がり構造
- 折れ曲がり構造の起源の解明
→エネルギースペクトル、質量組成の精密測定

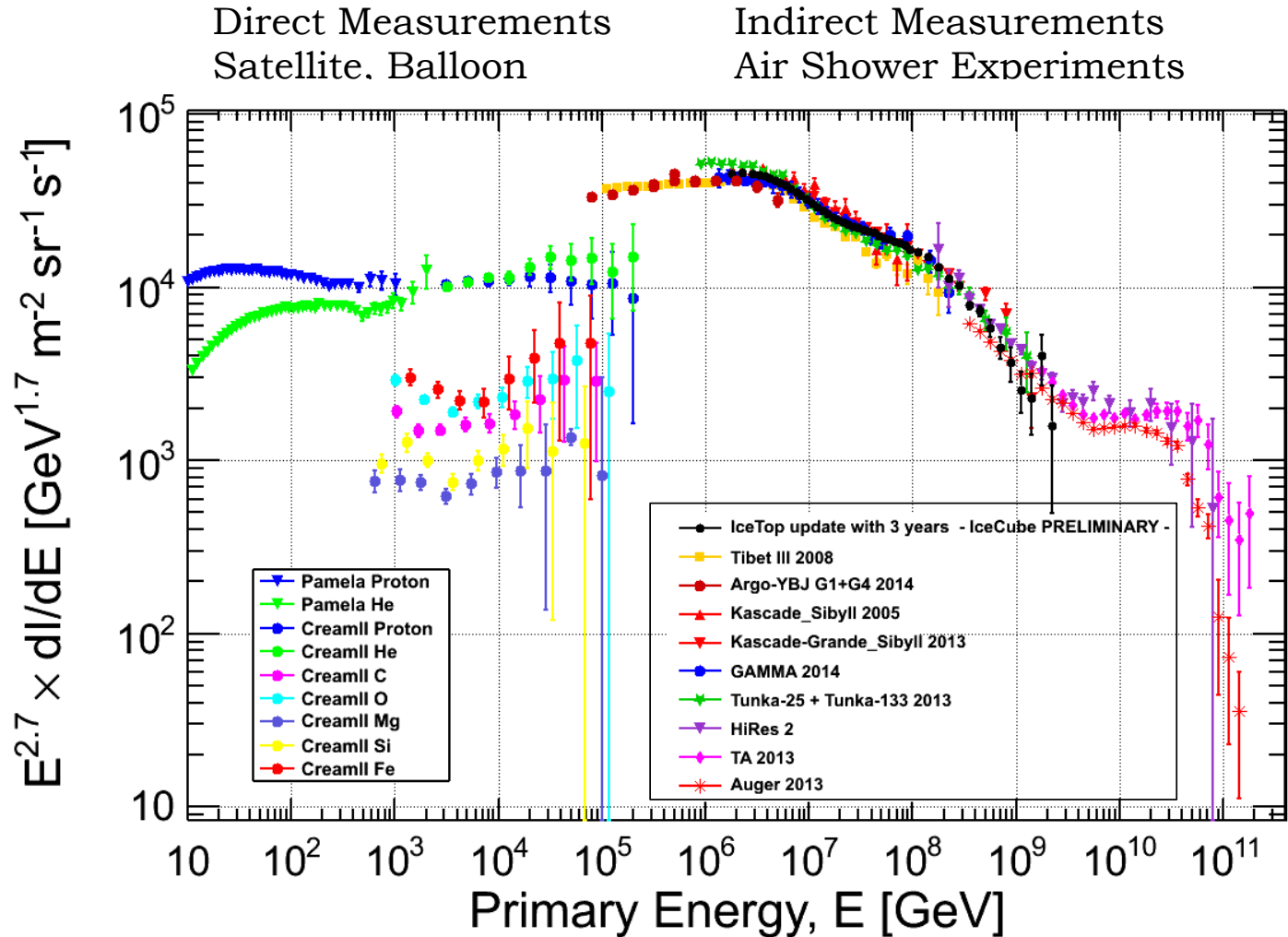
2. TALE実験

- $10^{16}\sim 10^{18}$ eV領域での空気シャワーのHybrid観測
- エネルギースペクトルと粒子組成の精密測定
- FDは2013年9月から定常観測
- SDは2013年5月から16台で観測、2018年度に設置予定

Back Up

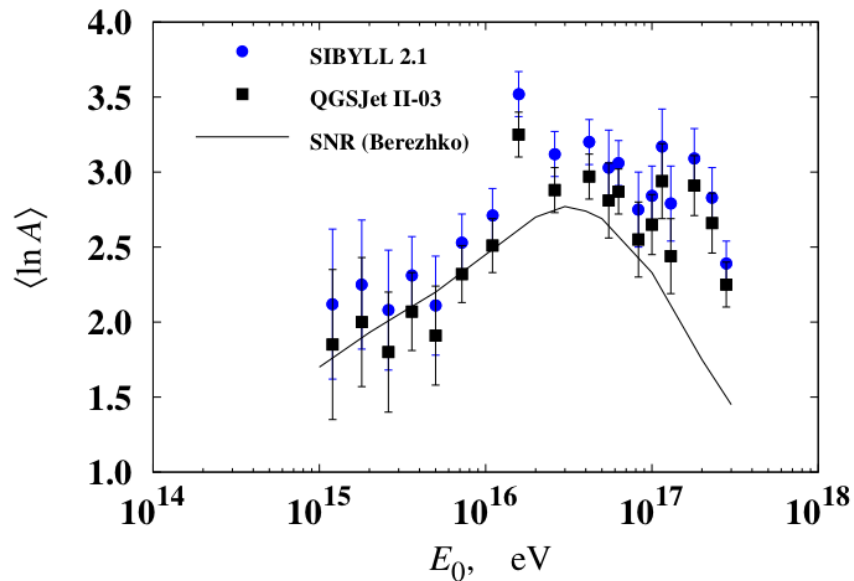


宇宙線のスペクトル

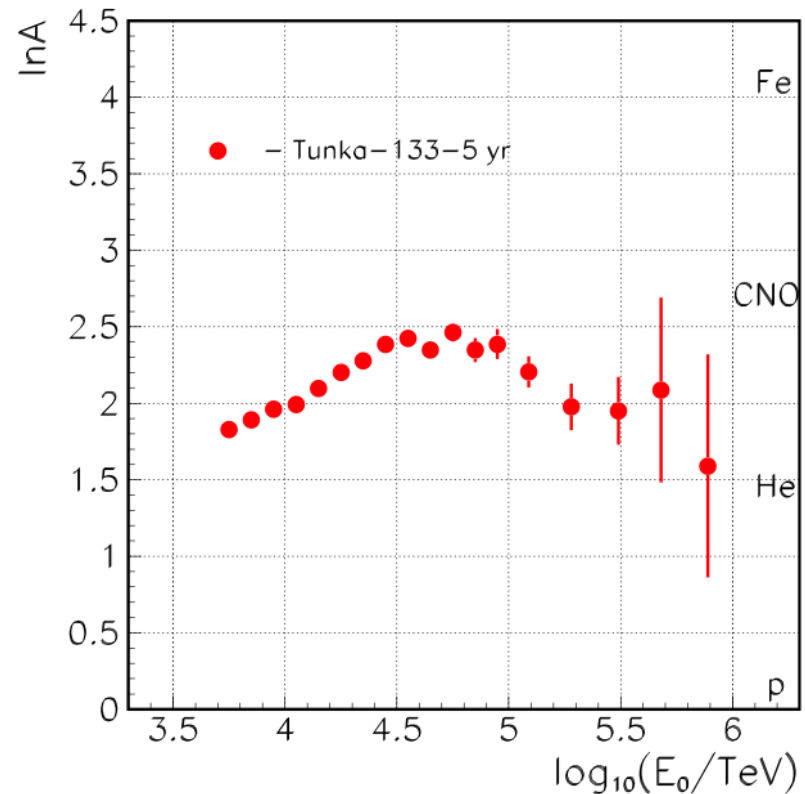


宇宙線の質量組成

- 多くの実験で宇宙線の質量組成も測定

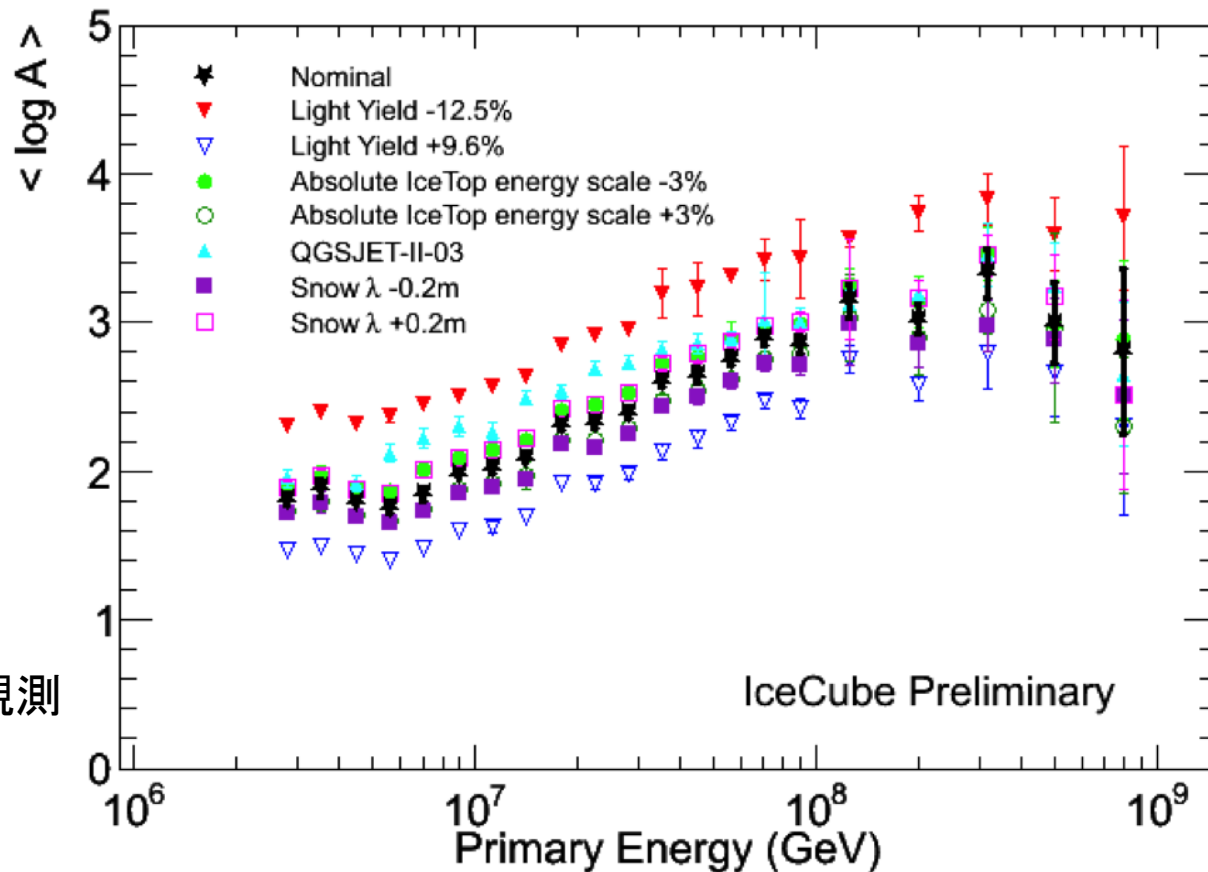


Yalutsk実験(左)とTunka実験(右)で観測された質量組成



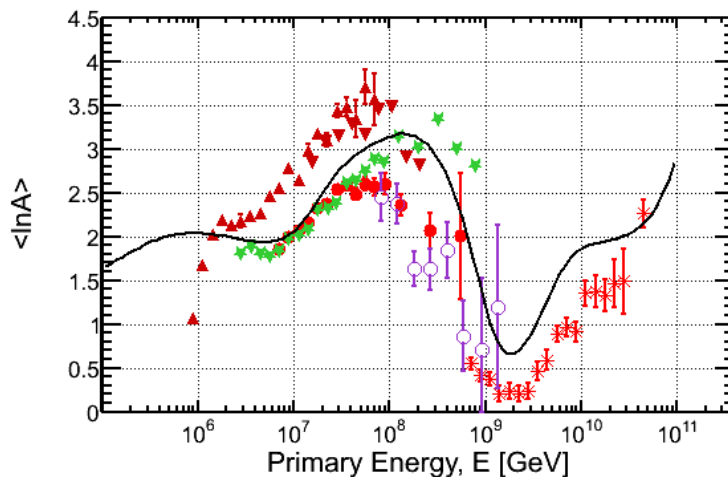
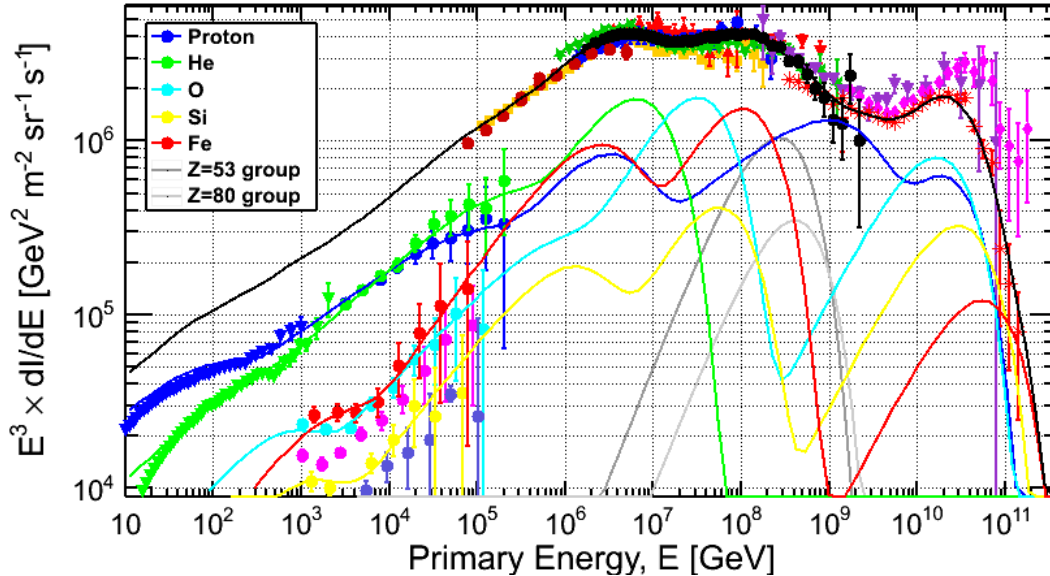
宇宙線の質量組成

- 多くの実験で宇宙線の質量組成も測定



IceCube実験で観測
された質量組成

宇宙線の折れ曲がり構造のモデル



Perfect demonstration
of Peters cycle:

When protons accelerated
to E_{max}^p a nucleus with Z will be
accelerated up to
 $E_{max}^Z = Ze \times R = Z \times E_{max}^p$

where magnetic rigidity
 $R = Pc/Z$

Bernard Peters 1961

Fit the elemental spectrum
with Gaisser's formulation
of Peters cycle

$$E \frac{dN}{dE} = \sum_{\text{elements}} A_i E^{-\gamma_i} e^{-\frac{E}{Z_i E_{\text{cutoff}}}}$$

A Amplitude
 γ spectral index
 E_{cutoff} cut-off energy

スペクトルの折れ曲がりのモデル

- knee(10^{15} eV付近)
 - 加速源の変化(SNR→他の天体(パルサー・星雲))
 - 銀河系内への閉じ込め効果の限界
- 2nd knee($10^{17.5}$ eV付近)
 - 宇宙線起源の銀河系内から銀河系外への遷移
→組成が重い原子核から軽い原子核へ変化

スペクトルの折れ曲がりのモデル

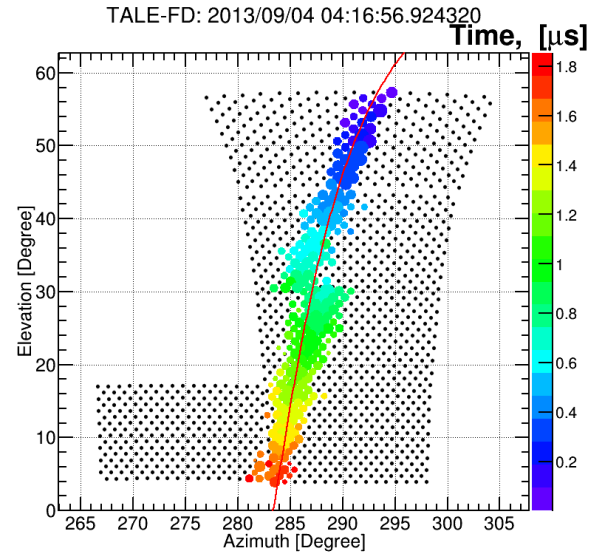
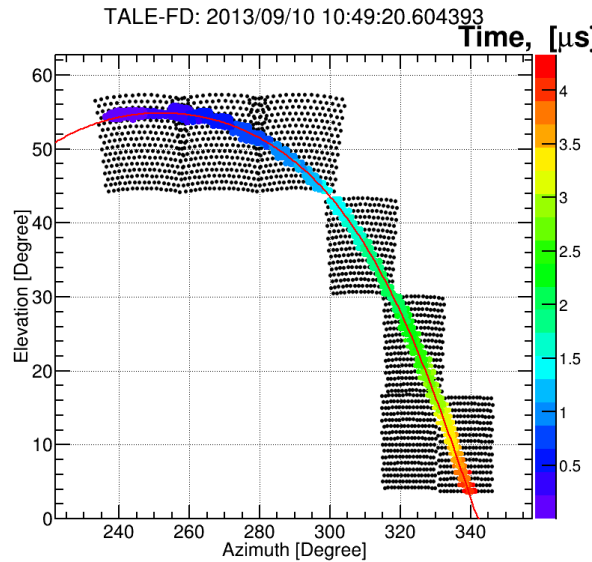
- ankle(10^{19} eV付近)
 - 宇宙線起源の銀河系内から銀河系外への遷移
→組成が重い原子核から軽い原子核へ変化
 - 宇宙線とCMB(宇宙背景放射)による電子対生成
- Cut off($10^{19.5}$ eV付近)
 - 宇宙線とCMB(宇宙背景放射)による π 中間子生成
(GZKカットオフ)

TALE Data Set

- Data set goes from 06/20/2014 to 03/31/2016 (*22 months*)
Good weather selection “clear overhead” + “no haze”
- A comparison of event data rates vs. MC expectation is used to determine periods of significant attenuation due to haze.
- Total on-time 1080.0 hours.

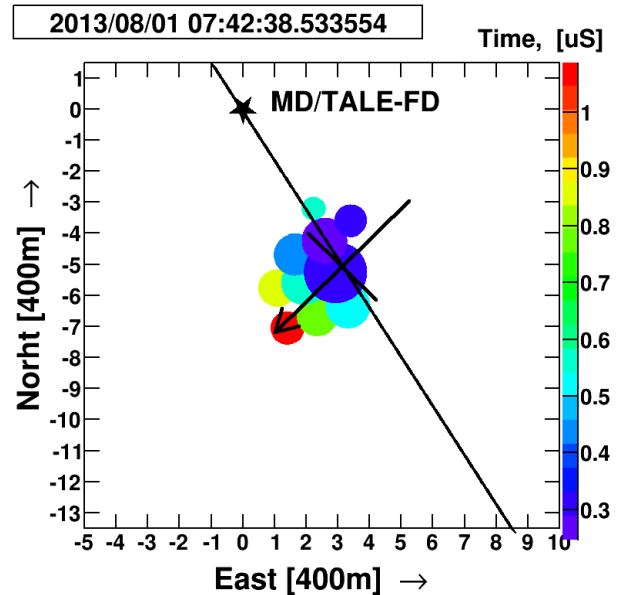
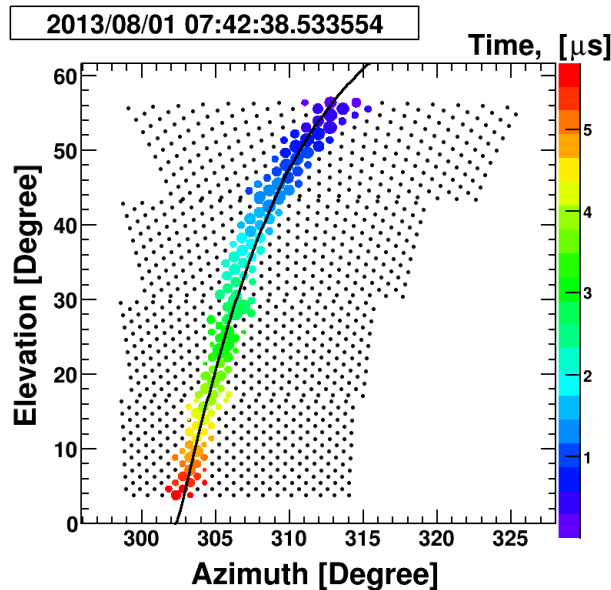
TALE Events

7 mirror event,
 $\log(E) = 16.5$



Parallax
 event,
 $R_p = 800m$

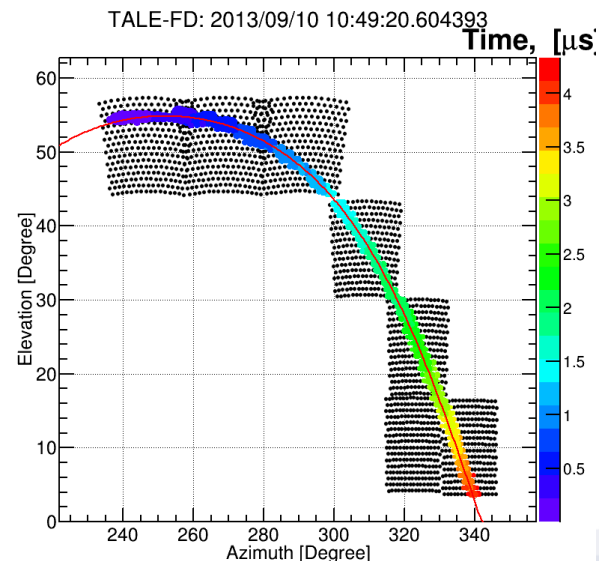
Hybrid event



TALE FD解析手順

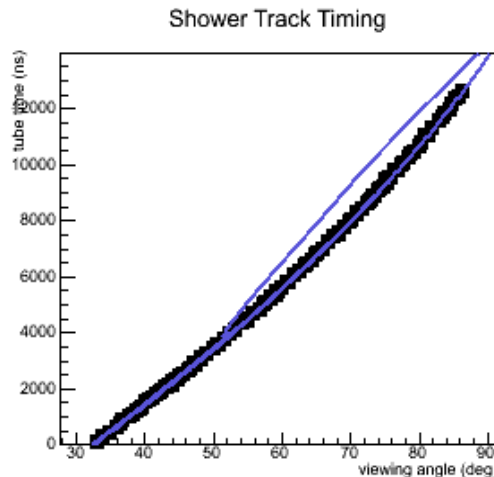
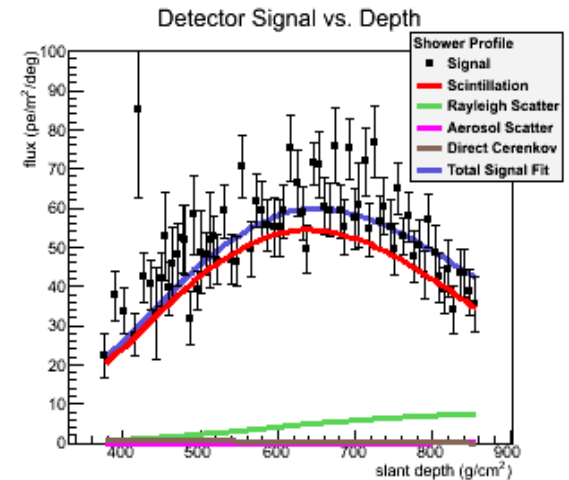
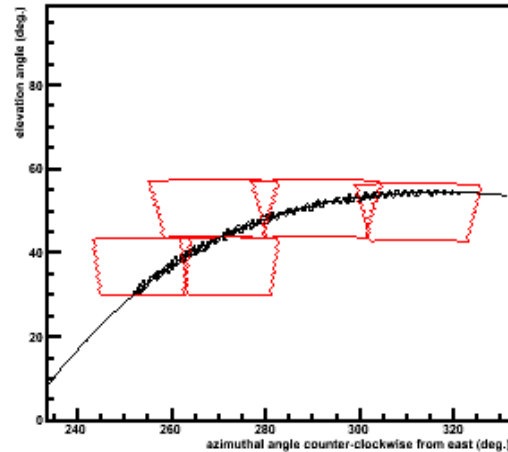
- ヒットしたPMTのパターンから、シャワー面を求める
- ヒットしたPMTのタイミングからシャワー軸を求める
- 求めたシャワー軸でシミュレーションでシャワーを降らせて、観測結果に一番Fitするエネルギー、シャワーの最大発達深さ(X_{\max})シャワーの最大粒子数(N_{\max})を求める

7 mirror event,
 $\log(E) = 16.5$



Example Fluorescence event seen by TALE FD

- Five telescope (eight with ring 1-2 mirrors) event.
- Event duration \sim few micro-seconds
- Long angular extent
- Likely to trigger ground array
- Threshold $\sim 3e16$ eV



TALE event data

Event Starting: 7: 0:0.695370

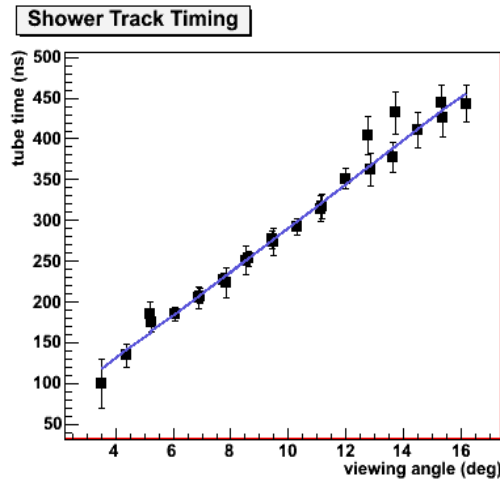
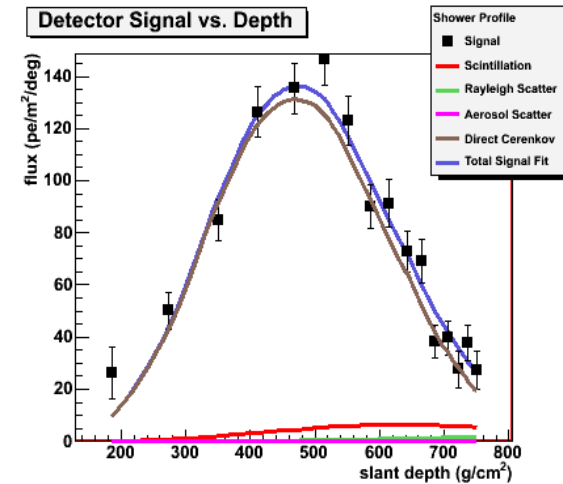
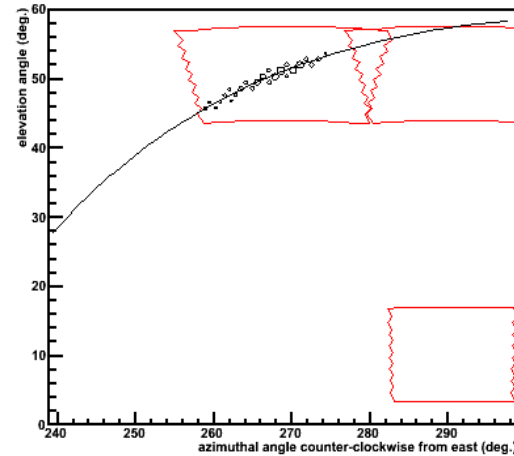
Energy: 0.530 EeV
 Shower max size: $3.565e+08$ particles
 Shower max depth: 631.247 g/cm²
 Profile Fit χ^2/ndf : 1.2395

Rp Magnitude: 5.839 km
 ψ angle: 55.1 degrees

Shower azimuthal angle: 8.2 degrees
 Shower zenith angle: 48.0 degrees
 Angle to Magnetic field: 60.5 degrees

Example Cerenkov event seen by TALE FD

- Most C'kov events are single telescope
- Event duration $\sim 100\text{ns}$ - $\sim 600\text{ns}$
- Short angular extent
- Unlikely to trigger surface detector
- Threshold $\sim 3e15\text{ eV}$



TALE event data

Event Starting: 0: 0:0.139663747441801

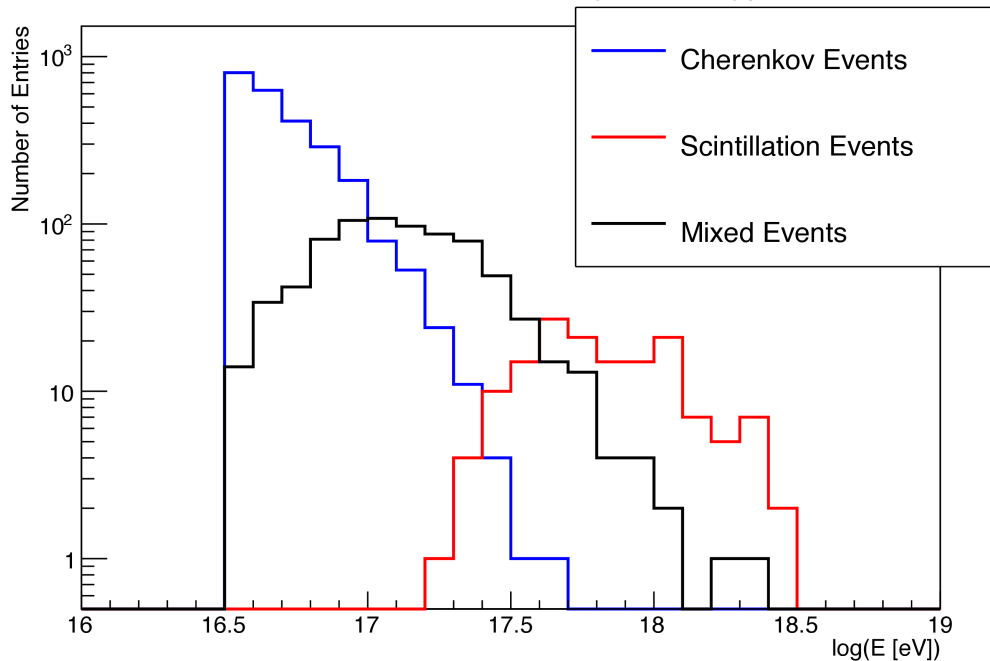
Energy: 9.241 PeV
 Shower max size: 6.143e+06 particles
 Shower max depth: 605.810 g/cm²
 Profile Fit χ^2/ndf : 0.7362

Rp Magnitude: 0.912 km
 ψ angle: 106.9 degrees

Shower azimuthal angle: -80.1 degrees
 Shower zenith angle: 35.0 degrees

TALE Cherenkov vs. Fluorescence

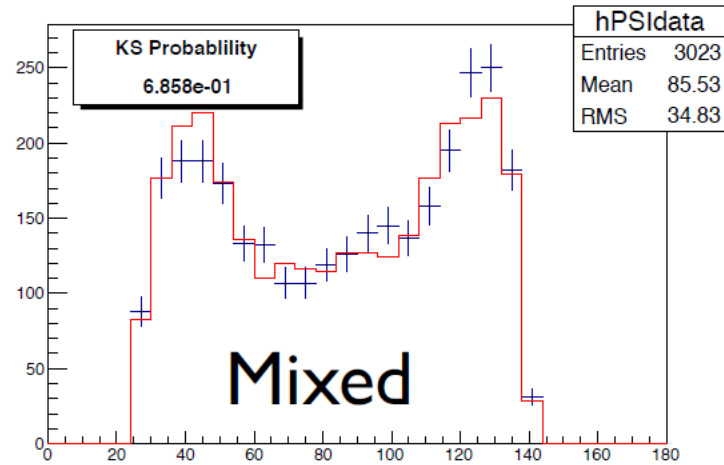
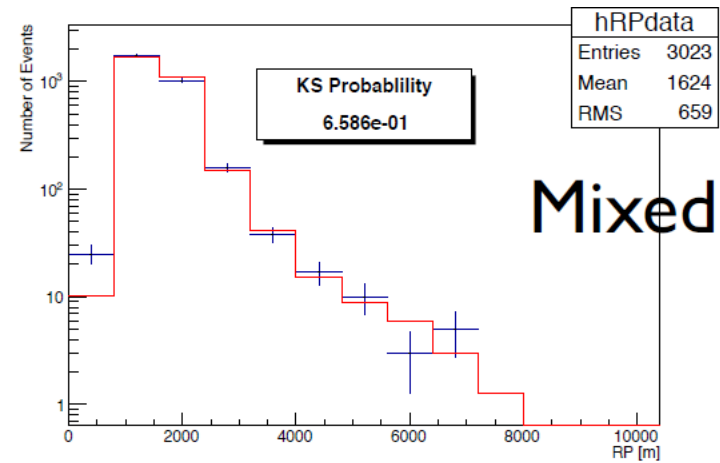
Event Distribution by Event Type



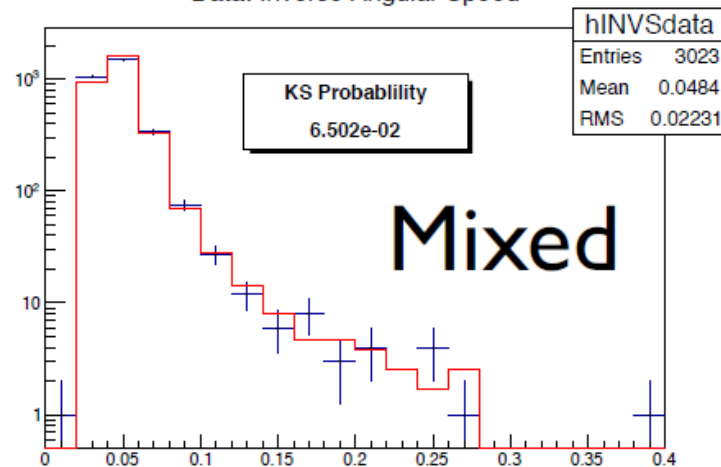
Unexpected result: many Cherenkov events are seen as tracks (most land ~ 0.5 km from FD).
Use profile constrained reconstruction.
Cherenkov light is bright \rightarrow can go lower in energy than expected.

TALE DATA/MC Comparisons

Mix PSI Data-MC

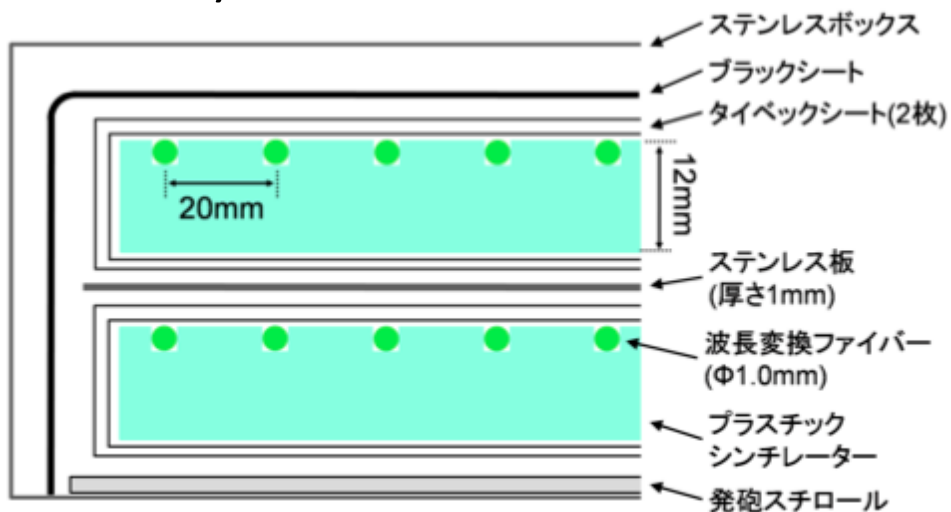


Data: Inverse Angular Speed



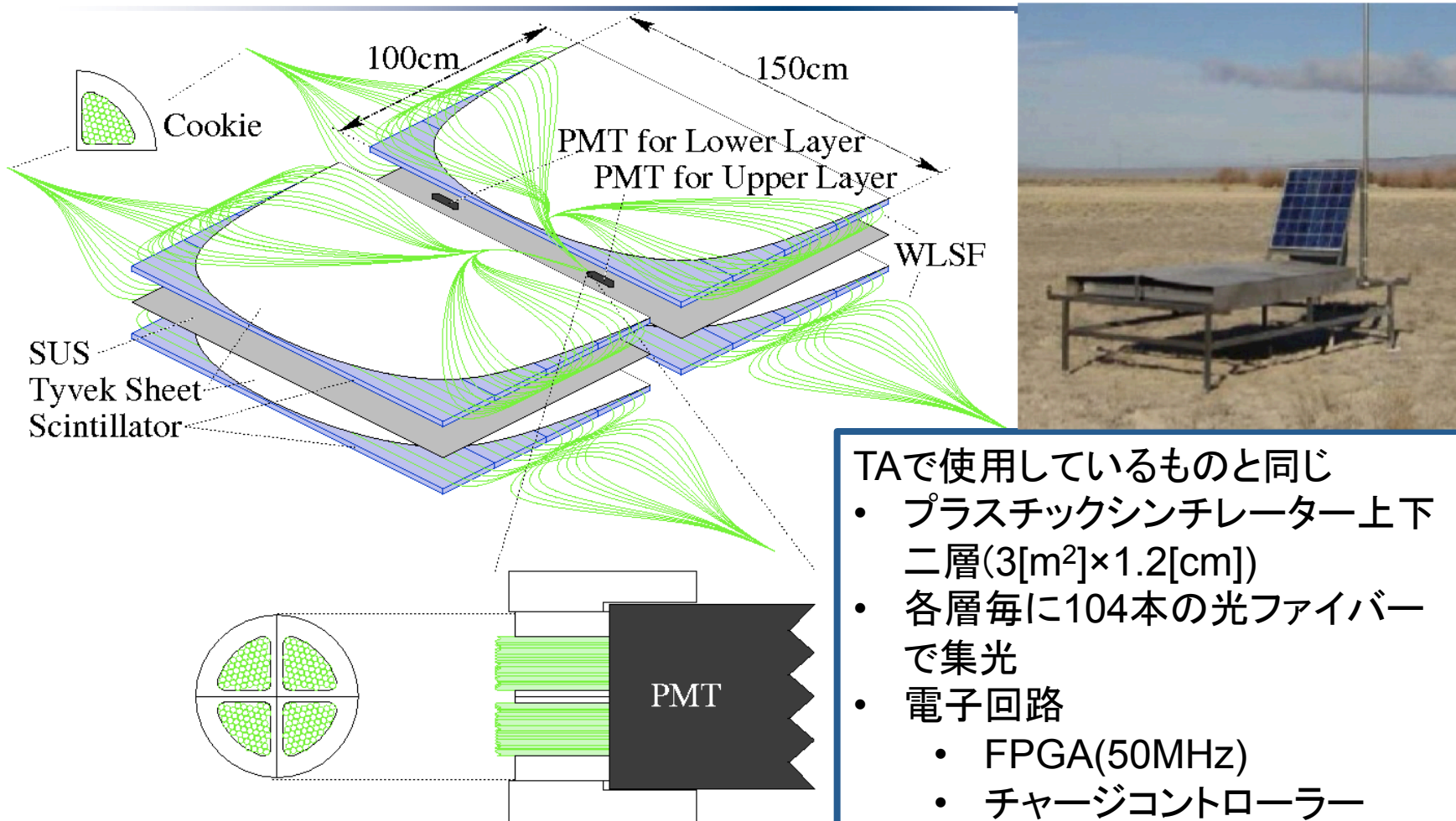
TALE SD

- 無線通信用アンテナ
- ソーラーパネル
- 屋根(鉄製、1.4mm)
- エレクトロニクス、バッテリー用のステンレスボックス
- シンチレーター用のステンレスボックス(上蓋1.5mm、下蓋1.2mm)



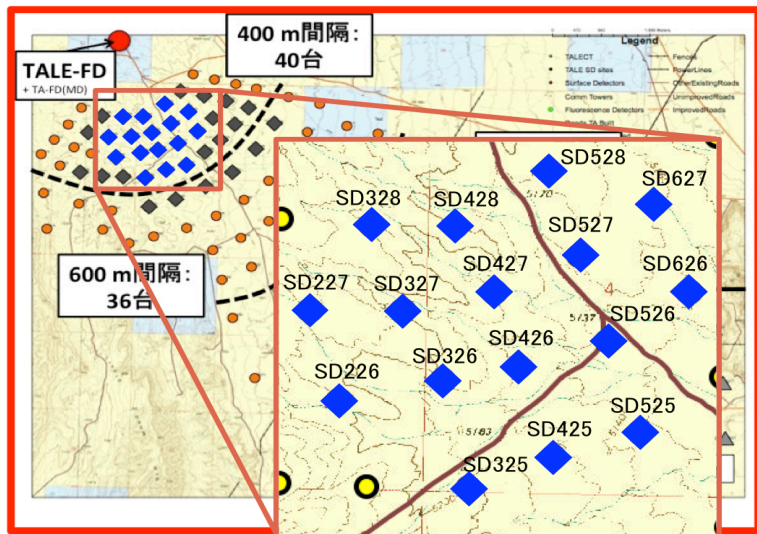
シンチレーター用ステンレスボックスの中身

TALE 地表検出器(SD)

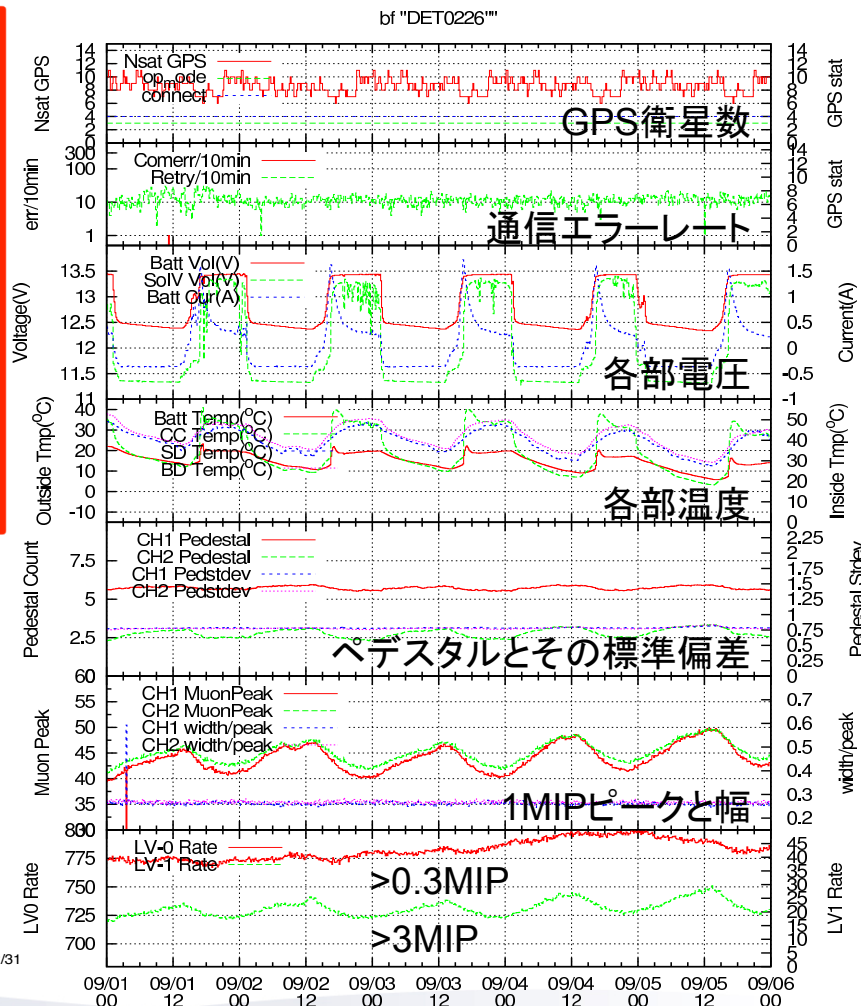
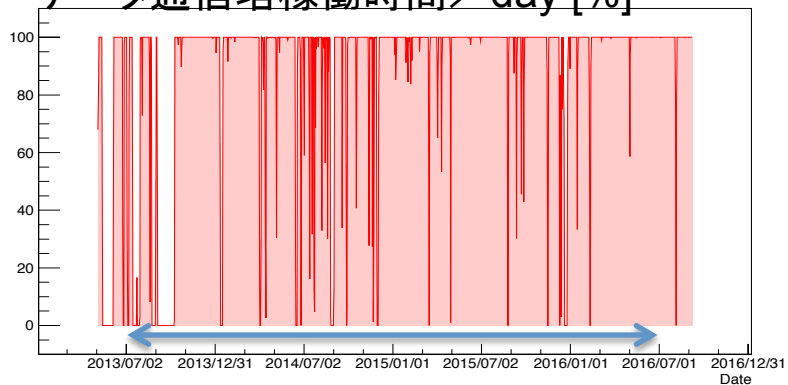


- TAで使用しているものと同じ
- プラスチックシンチレーター上下二層(3[m²] \times 1.2[cm])
 - 各層毎に104本の光ファイバーで集光
 - 電子回路
 - FPGA(50MHz)
 - チャージコントローラー
 - GPS
 - 無線LANカード

16台TALE-SDアレイの安定運用 (エレクトロニクス試験のため) 現状では2台が止められている



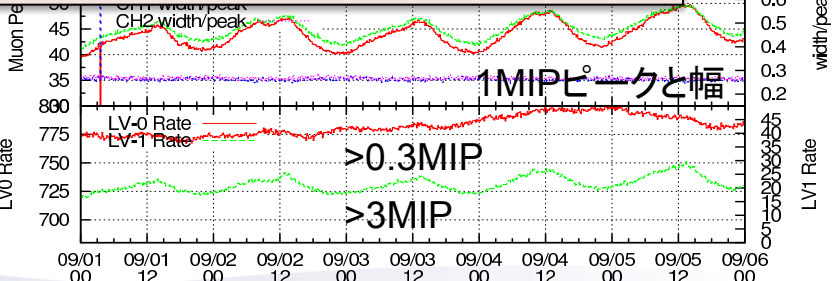
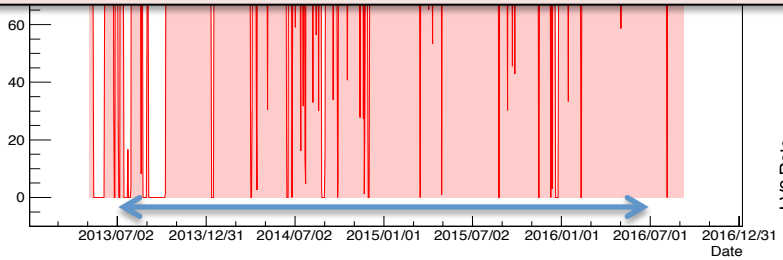
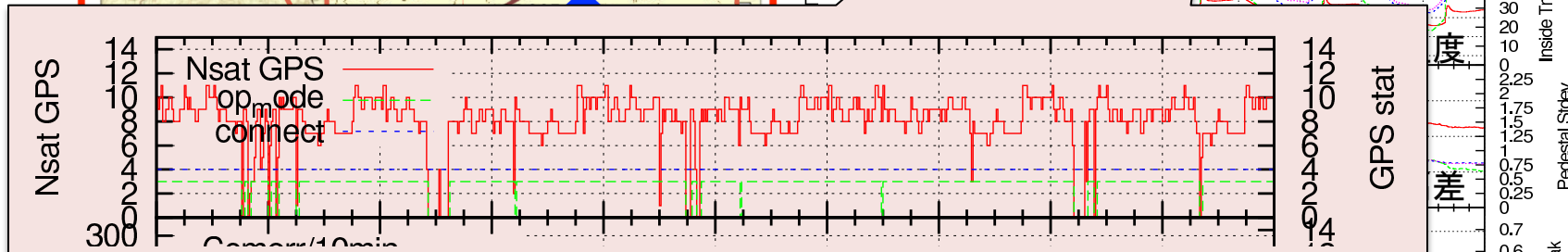
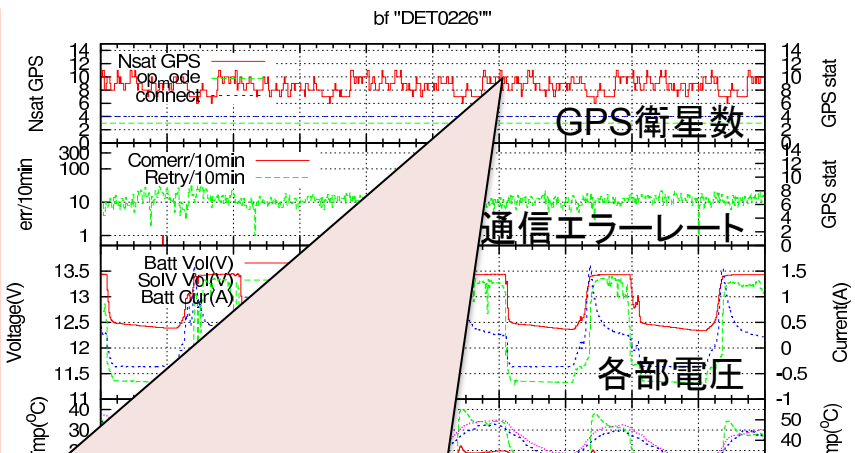
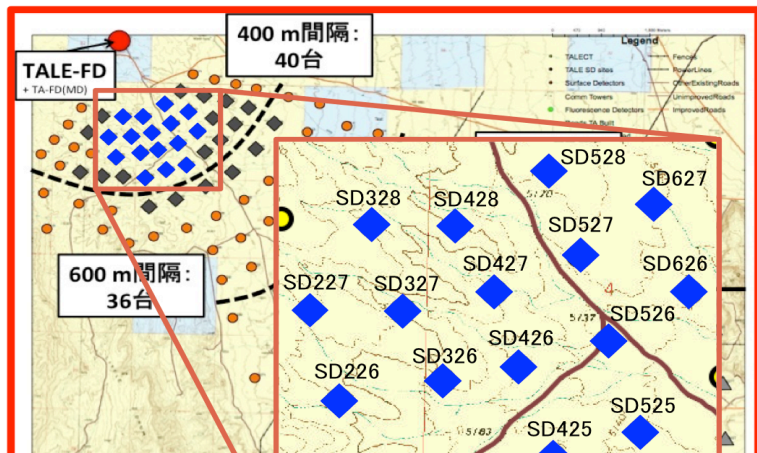
データ通信塔稼働時間/day [%]



16台TALE-SDアレイの安定運用

GPS衛星数が不安定
(GPSアンテナの向き?)

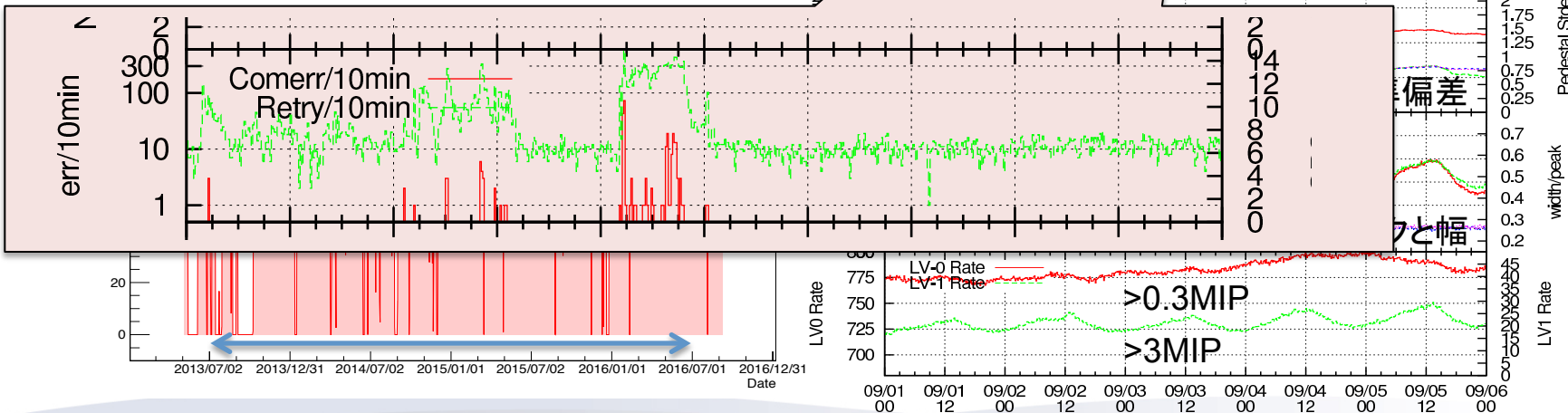
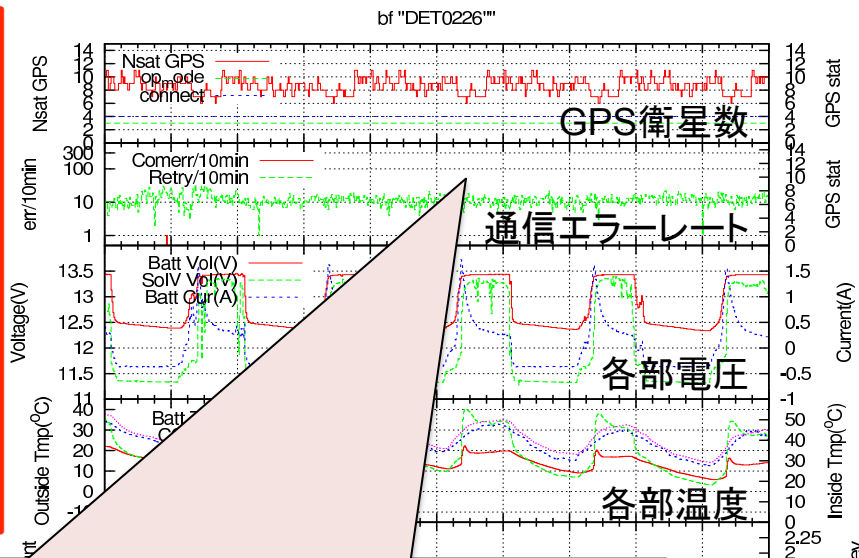
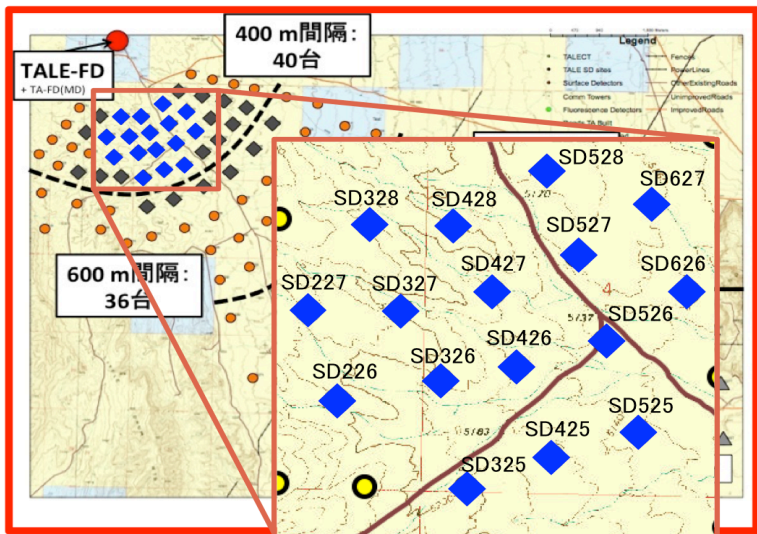
1台



16台TALE-SDアレイの安定運用

無線LAN通信が不安定
(無線アンテナの向き?)

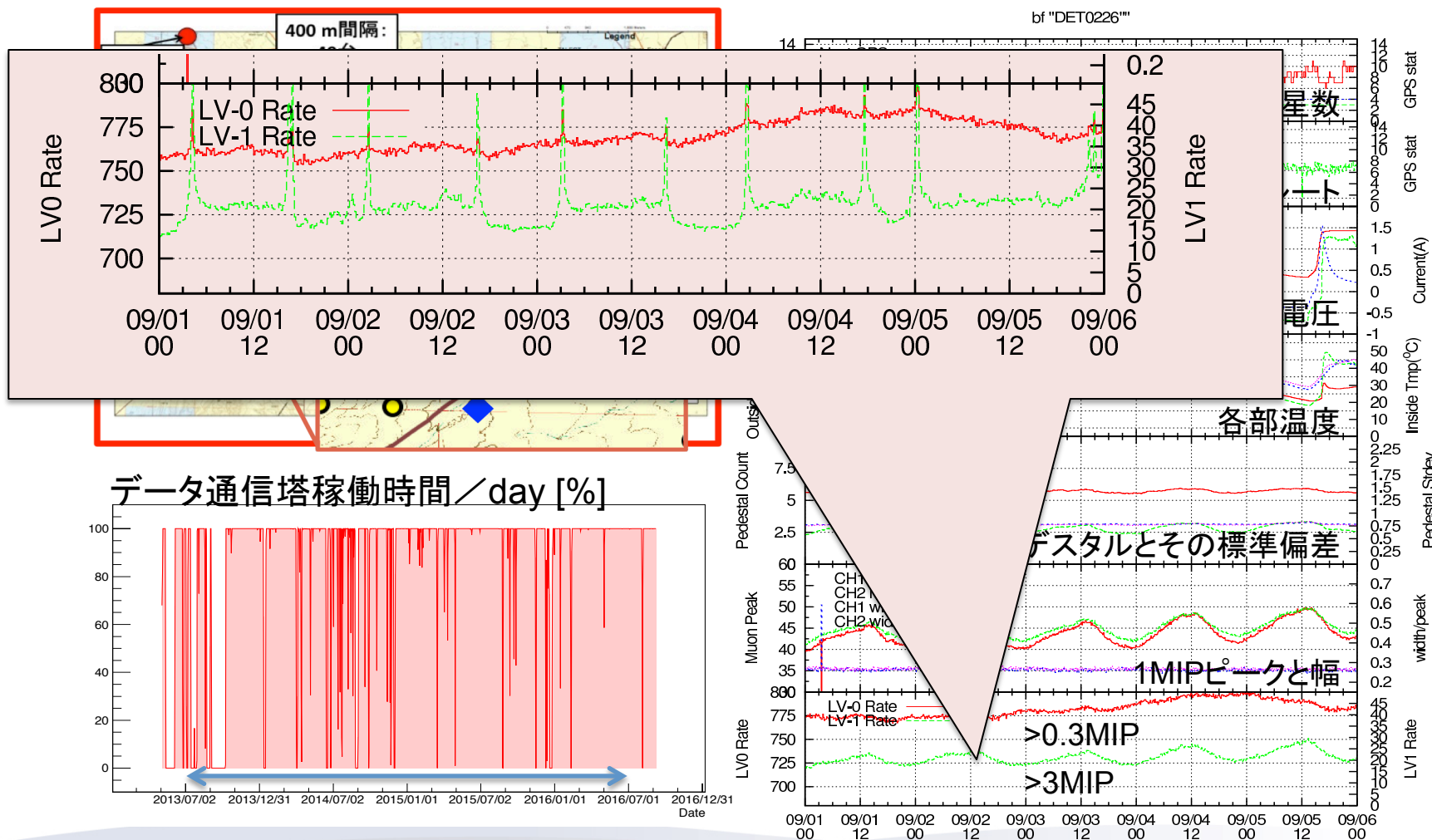
1台



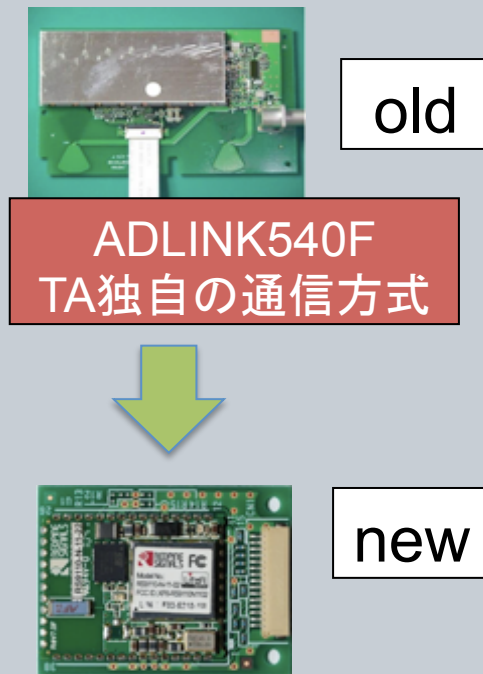
16台TALE-SDアレイの安定運用

放・充電切り替えのタイミングで トリガーレート変動

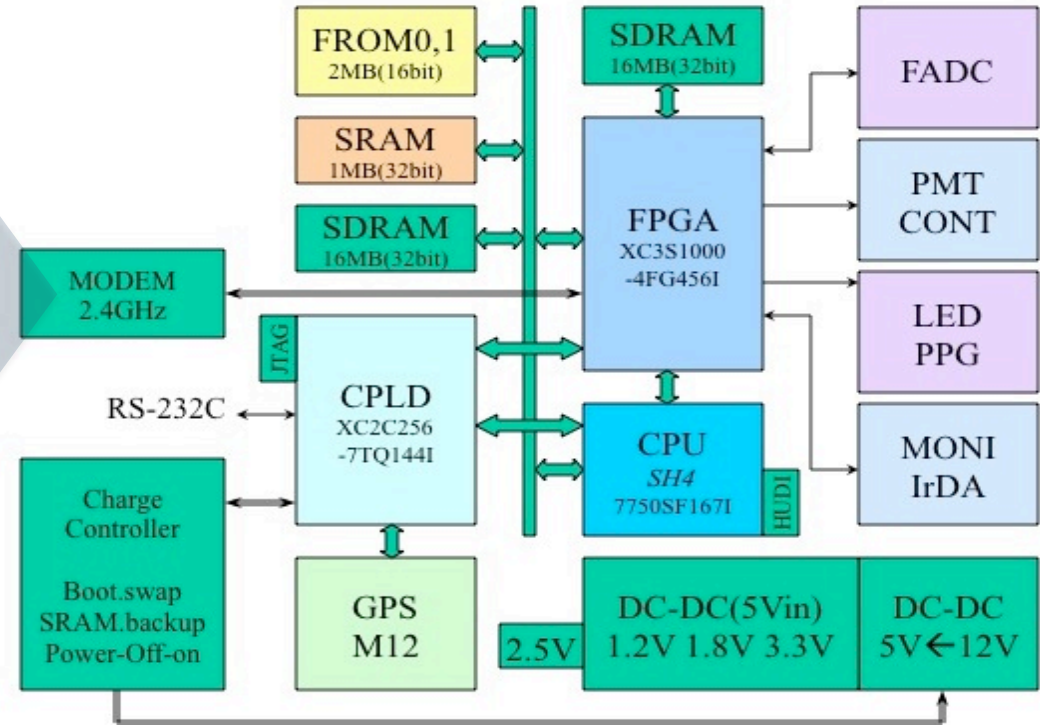
1台



TALE/TAx4新型エレクトロニクス

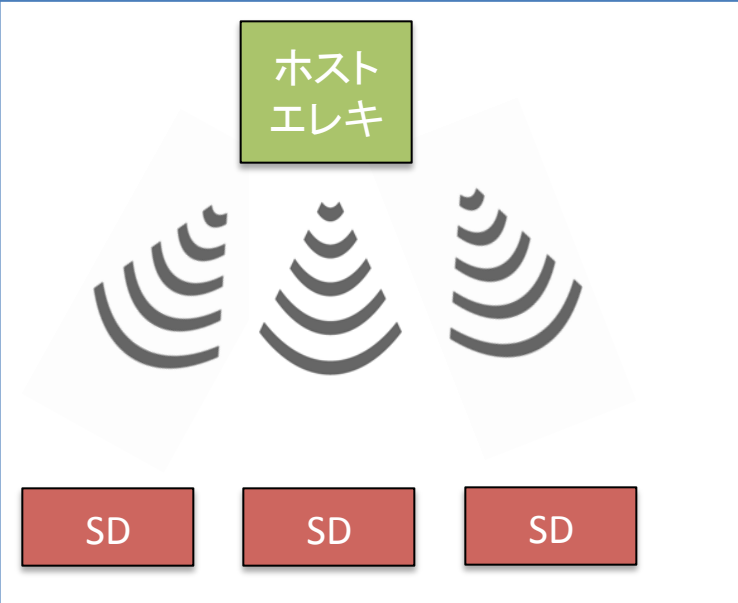
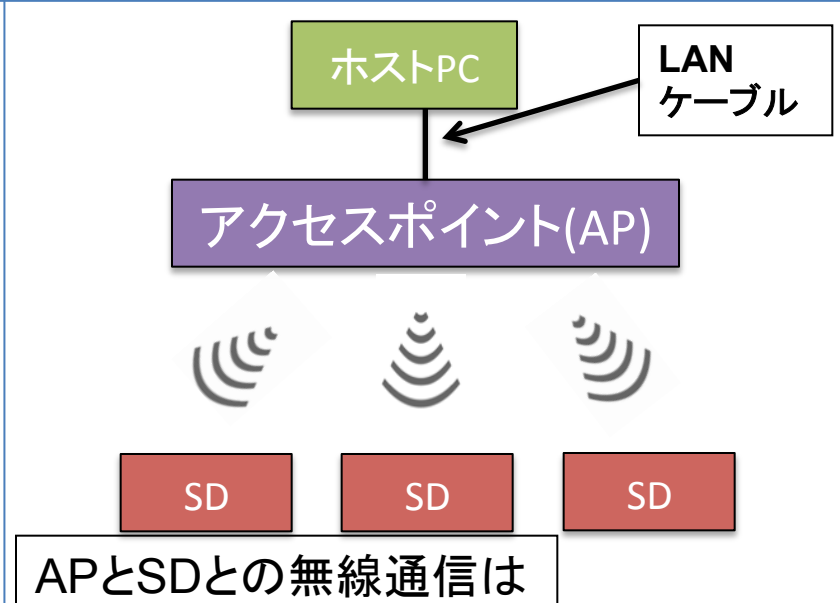


Redpine Signals :RS9110-N-11-22
TCP/IP通信



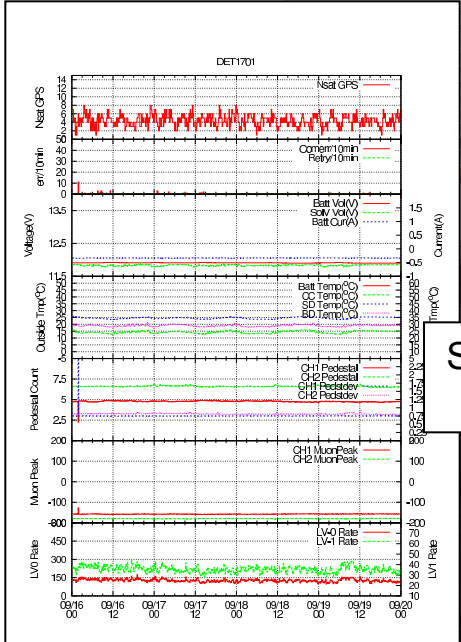
- ADLINK540Fの生産が終了
- TA-SDエレキの内無線LANモデムだけを変更し、ファームウェアを最適化

TAとTALE/TAx4のSDアレイDAQシステムの比較

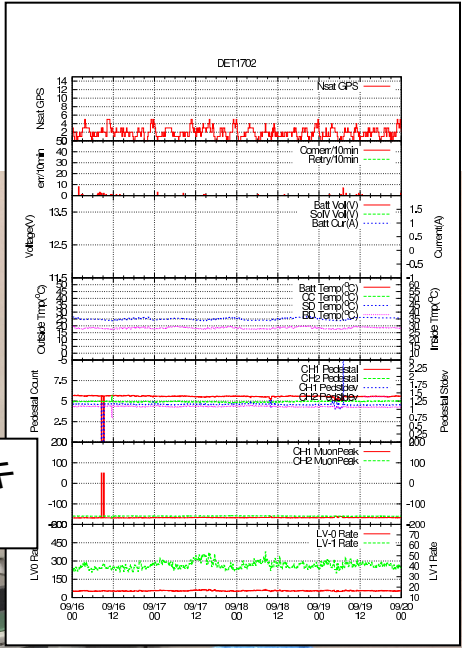
	Existing System (TA)	Developing System (TALE TAx4)
通信方式	TA独自のプロトコル	TCP/IPプロトコル
SD	旧式W-LANモジュールを使用	新規W-LANモジュールを使用
DAQホスト	ホストエレキ	ホストPC(ラズベリーパイ2モデルB)
その他		アクセスポイント(AP)が必要
概略図		

APとSDとの無線通信は
約18kmまでテスト済み

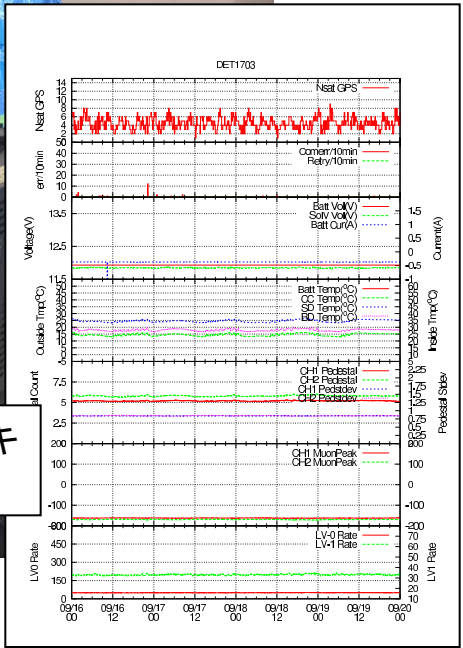
OCUでのプロトタイプSDアレイの運用



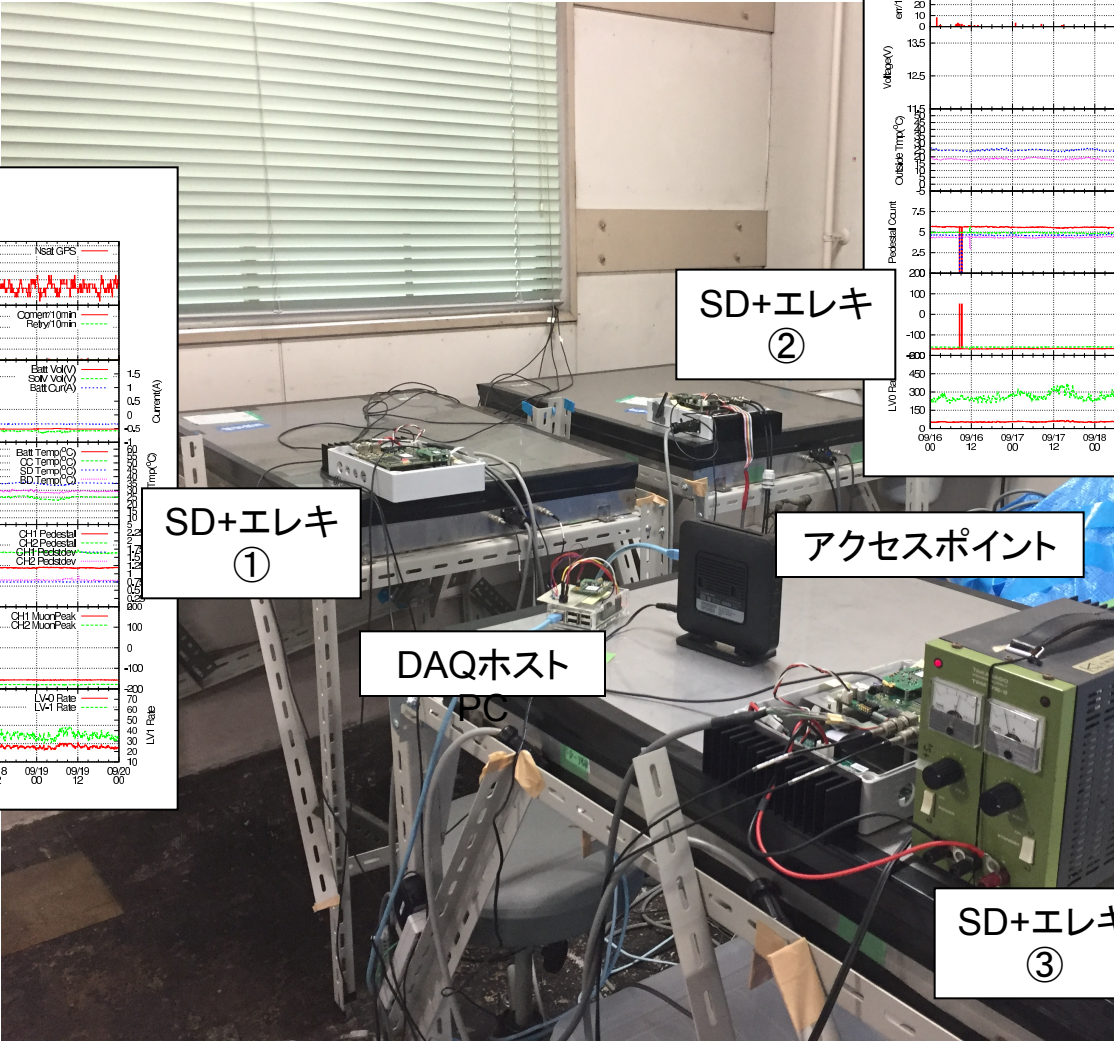
SD+エレキ
①



SD+エレキ
②



SD+エレキ
③

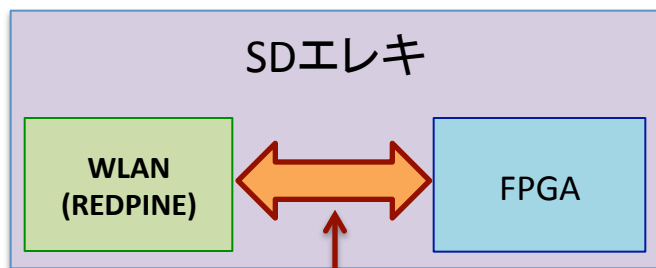


DAQホスト

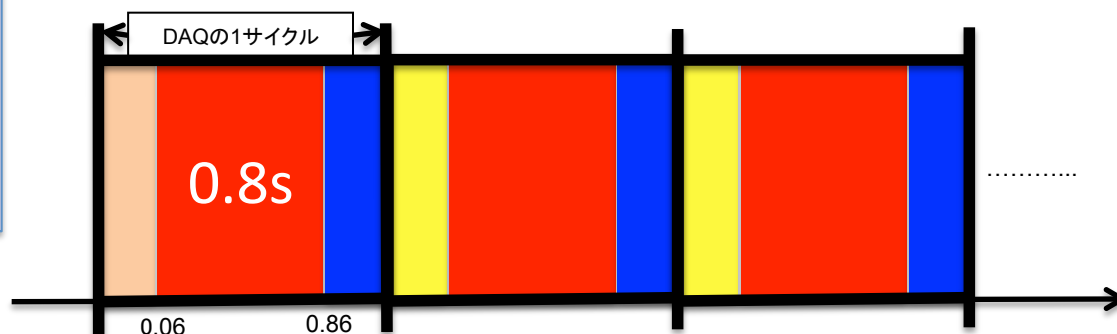
アクセスポイント

高速化(ホストPC1台あたりの制御SD台数増加)

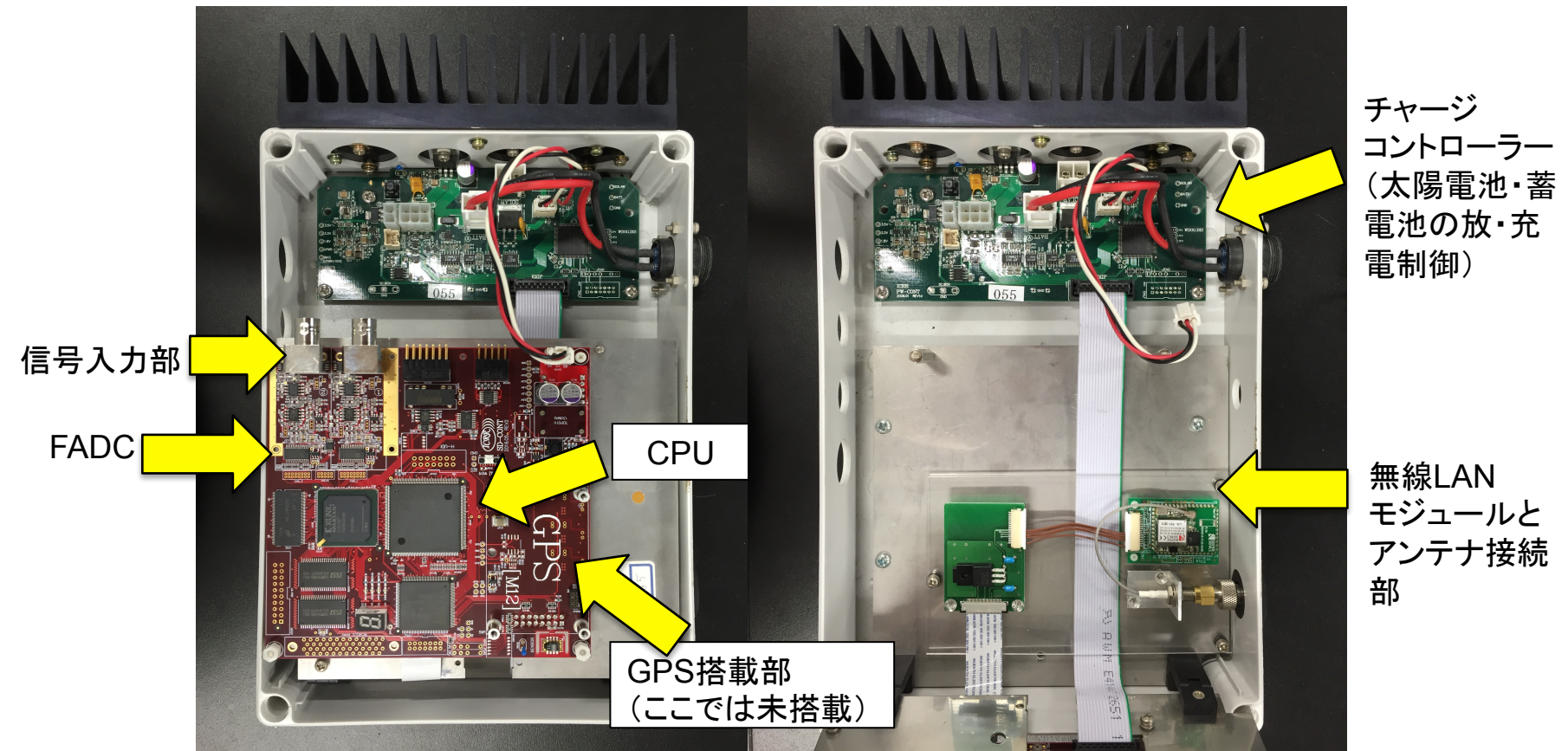
- DAQ時、ホストPCは1台のSDと10msほどで通信可能。
- ホストPCはSDからトリガーテーブルを受信するのに0.8s使用可能。
=>1台のホストPCでDAQ時、80台ほどのSDを管理できる。
- TALE-SDは103台設置する
 - ✓ ホストPCを2台にしてSDを52台ずつ管理する
 - ✓ SDからのレスポンスの高速化:
=>SDエレキのW-LANモジュールとFPGA間のインターフェースをUARTからSPIに変更すれば1台のホストPCでDAQ時106台ほどのSDを管理できる。(現在取り組み中)



REDPINE-FPGA間のインターフェースをUARTからSPIに変更



新型エレクトロニクス製作



現在までに4台を試験的に製作 → 動作試験を実施中
 → 今年中に100台製作 (TAx4分、TALE分合計で) → 日本国内での試験後、ユタへ

新型エレクトロニクス製作

