

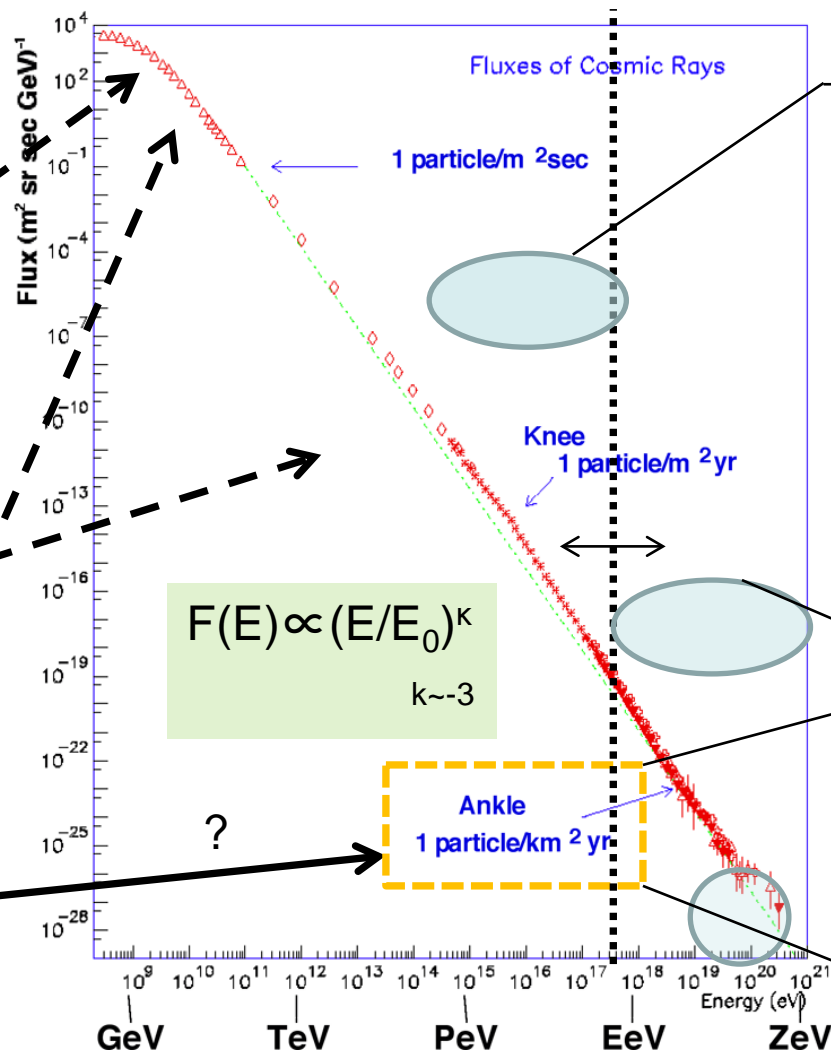
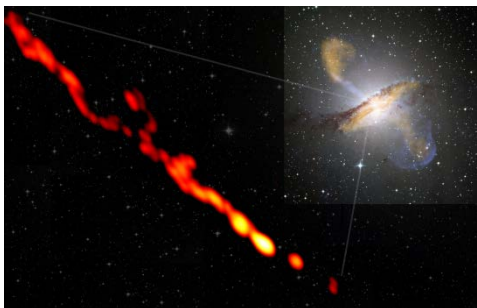
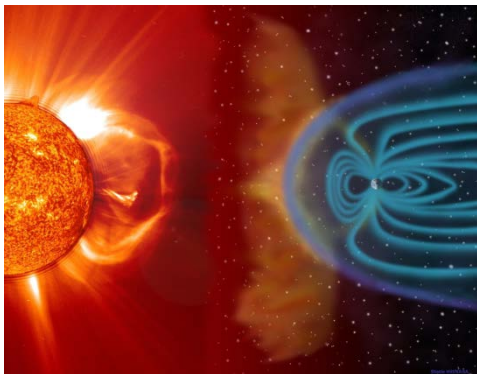
Telescope Array 宇宙線観測実験での 遠隔地データ収集システム



東京大学 宇宙線研究所
野中敏幸

宇宙線

荷電粒子 エネルギースペクトル と 加速候補天体



銀河系内起源

観測には大規模な露出が必要。宇宙線が大気と衝突して生成する粒子カスケード現象(空気シャワー)を観測。(チェレンコフ光、窒素蛍光望遠鏡、粒子検出器)

銀河系外起源

極高エネルギー宇宙線

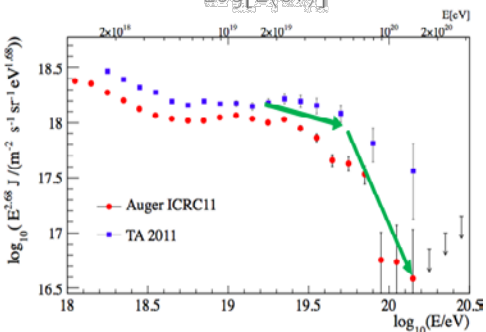
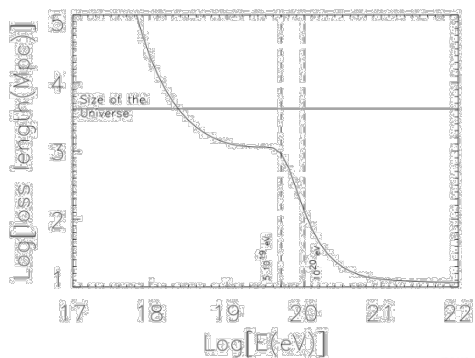
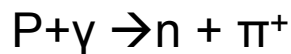
- ・Telescope Array 実験
- ・Pierr Auger 実験

~1000km²の検出装置が必要。

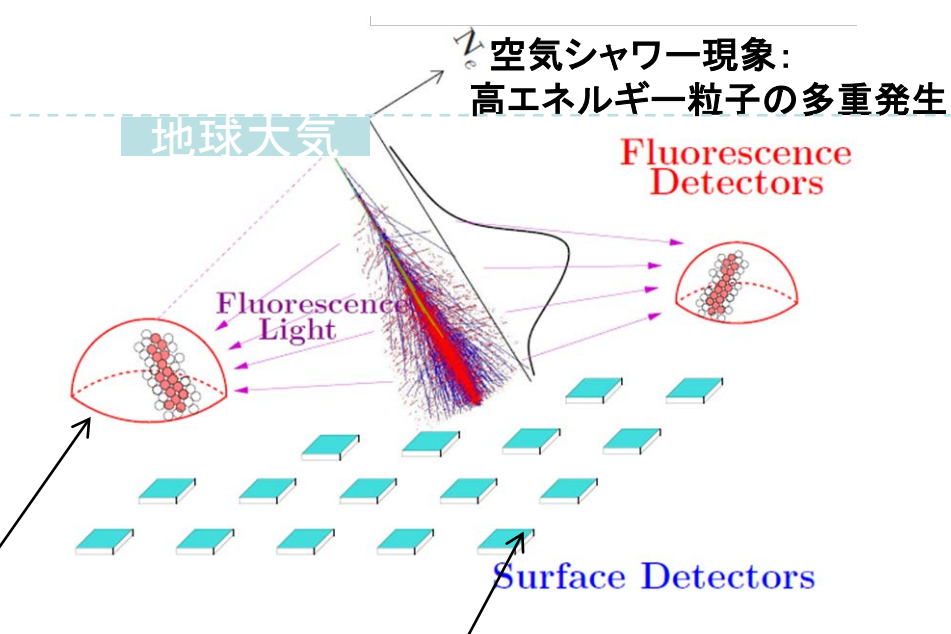
極高エネルギー宇宙線 観測

エネルギースペクトル、原子核組成、
到来方向、から生成源天体・加速機構・
伝播過程に迫る。

例: スペクトルの形状からの組成と線源距離の示唆
10^{19.7}eV”陽子” + 宇宙背景放射



大気を検出器とした測定



大気蛍光望遠鏡



地表粒子検出器

Telescope Array 宇宙線観測実験

Telescope Array 実験サイト N39° W 112° 1370m a.s.l 米国ユタ州



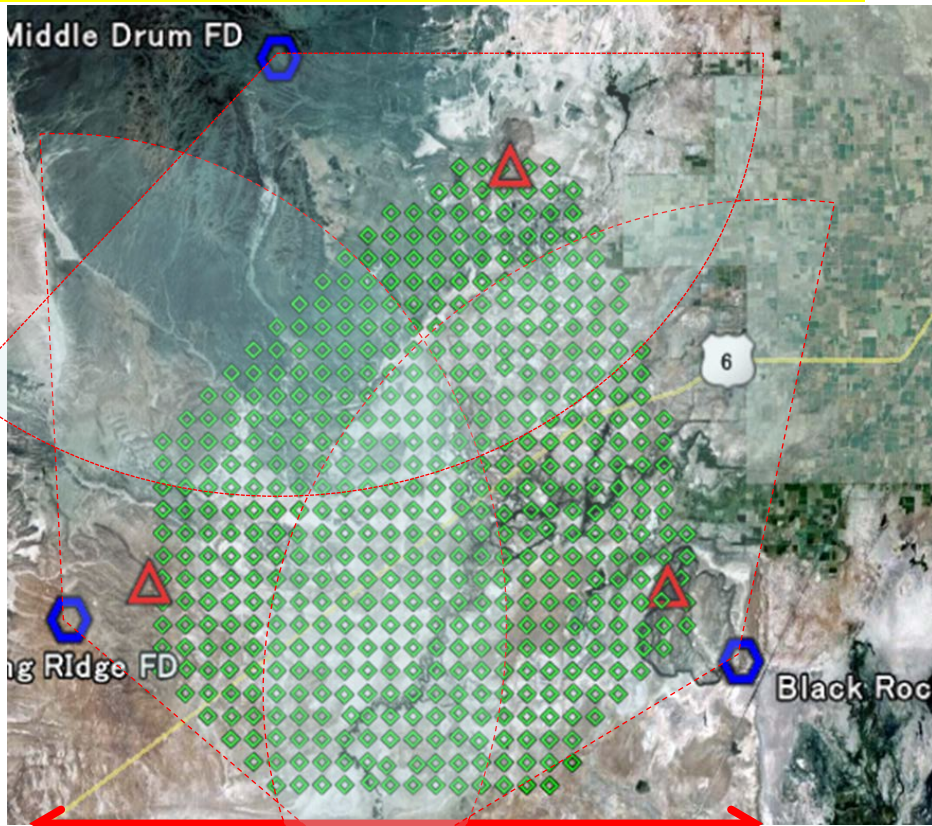
地表粒子検出器

X 507台



蛍光望遠鏡

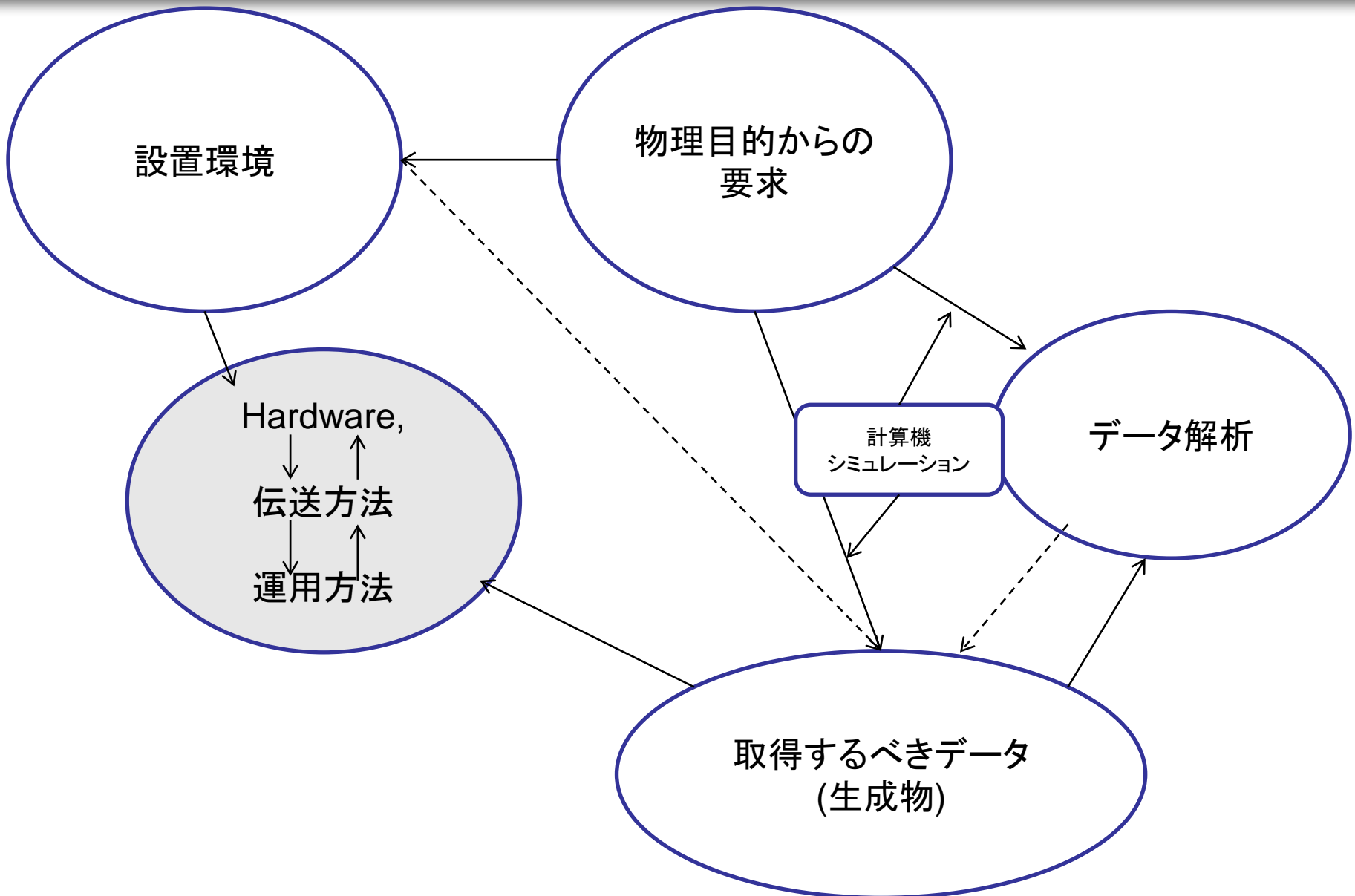
X 3か所



~30km

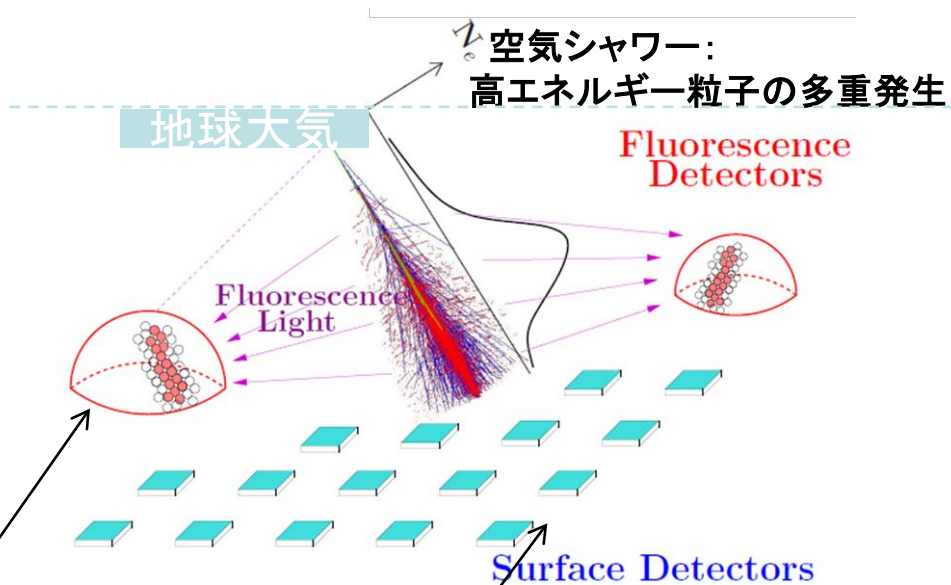
高い晴天率 人口光無し 電力無し +自然保護対象
気候：夏 ~40°Cmax 冬 ~-30°Cmin 日較差 25°C

システム構成を決める要因



極高エネルギー宇宙線 観測

大気を検出器とした測定



大気蛍光望遠鏡



地表粒子検出器

観測目的が決めるシステムの概要

要求統計量 (@Telescope Array実験)
宇宙線スペクトルより、
~ $10^{18.5}$ eV 宇宙線 100000イベント/year
→ 有効検出面積 1000km²
→ 標高 ~1400m 晴天率 大気透明度
→ → Off Grid!

観測対象の現象:

空間的広がり : R~3km @地表面
時間的広がり : ~10 μ 秒

事象の再構成からのシステムへの要求:

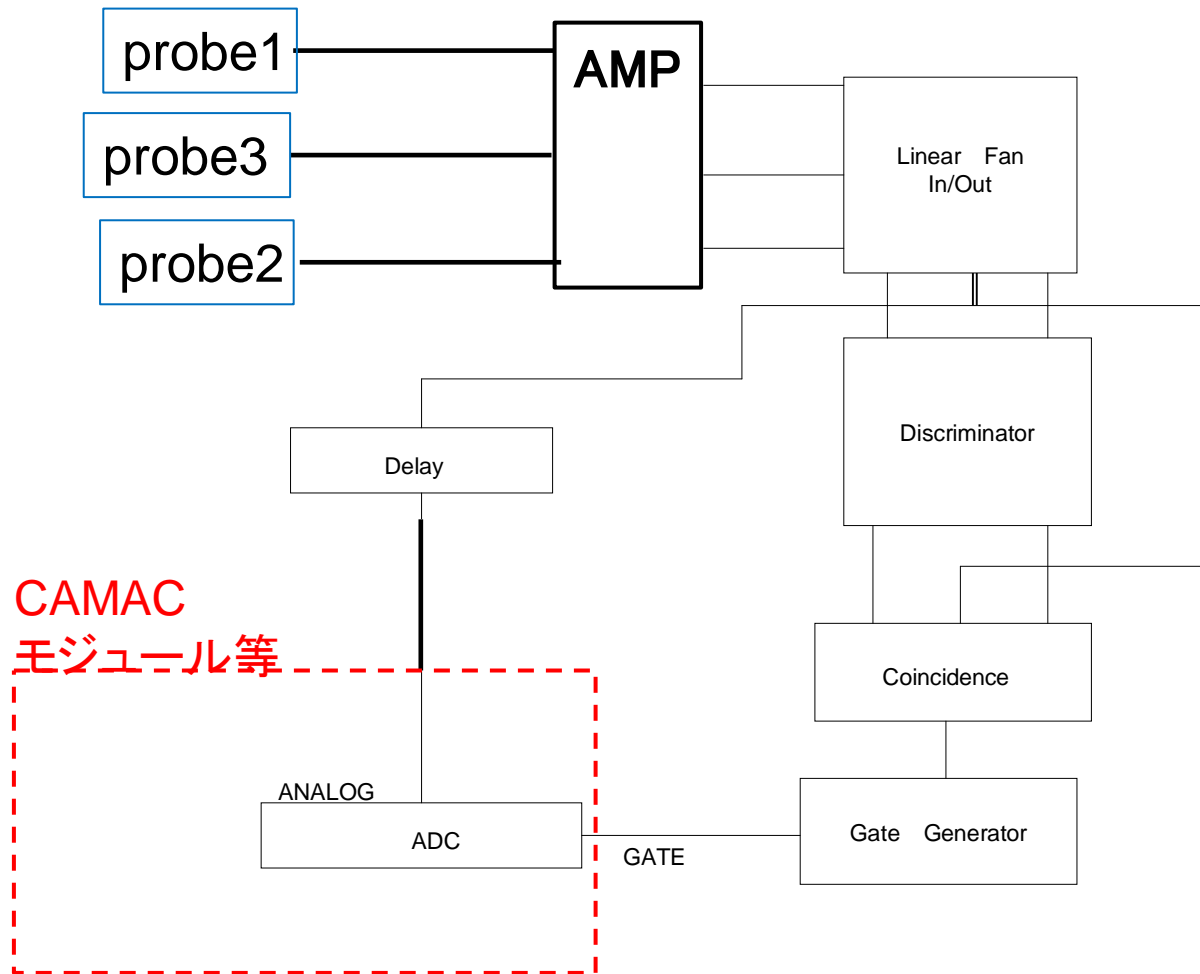
◎ 地表検出器面積・設置間隔
3m² 1.2km 間隔 → 地表検出器600台

◎ 望遠鏡集光面積・設置数
3m 12基 x 3ステーション

◎ 信号記録サンプリング周波数
50Mps @地表検出器
(20Mps @蛍光望遠鏡)

実験室での放射線計測

例: 同時放電を捉える事による 実際のミュオン測定システムの概念図
NIM・CAMACを用いて構想してみる。



放射線計測用モジュール

AMP
Fan in/out
Discriminator
Coincidence
Gate Gen
Delay(Cable)

通常実験室での測定では
同軸ケーブルで情報伝達。

設置間隔が広すぎて
ケーブルによる機器接続が
不可能

→ 無線LANによる情報伝達

Telescope Array 宇宙線観測実験

Middle Drum FD



Location: N39.3° W112.9°
1350–1500m asl

 FD station (× 3 station)

 Surface Array (507 SD)

 Communication tower

FD



● 1.2 km grid SD (3m²)

● 3 sub array :

+cross boundary trigger

→ Total 507 SD

● Total detection area ~700km²

ng Ridge FD



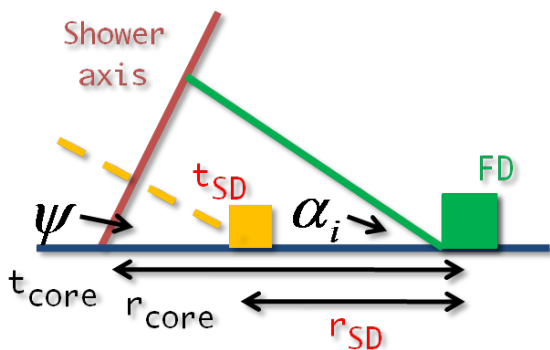
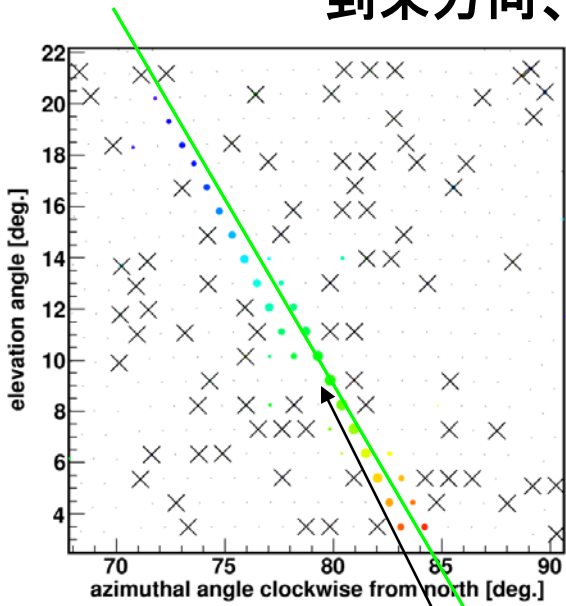
Black

SD

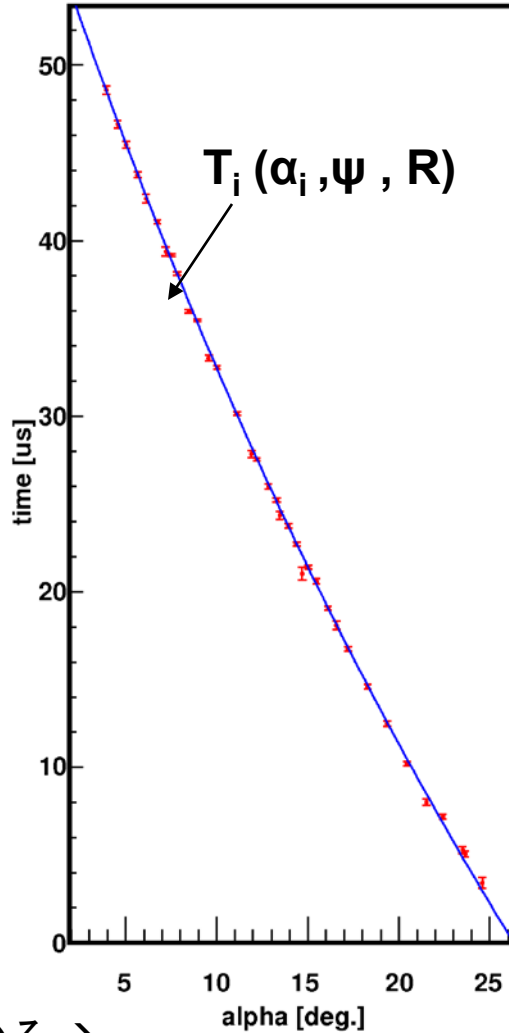


望遠鏡観測データ

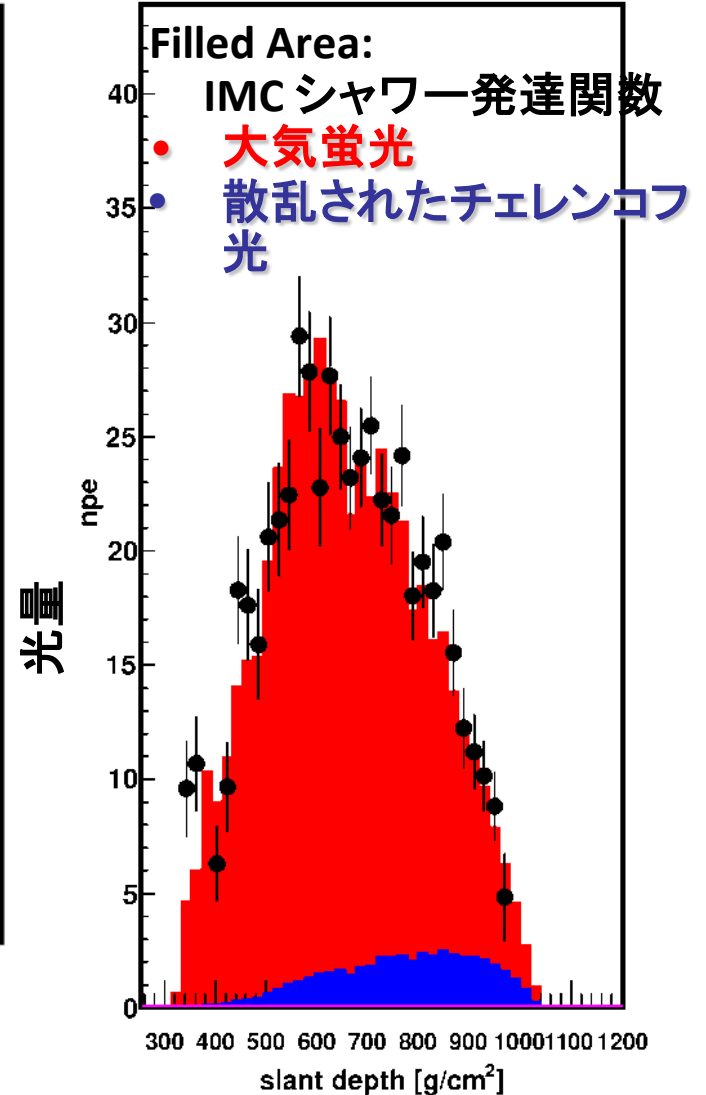
到来方向、コア位置推定



SDの時刻情報を用いる →
 ψ 、軸距離の決定精度向上 (Hybrid 解析)

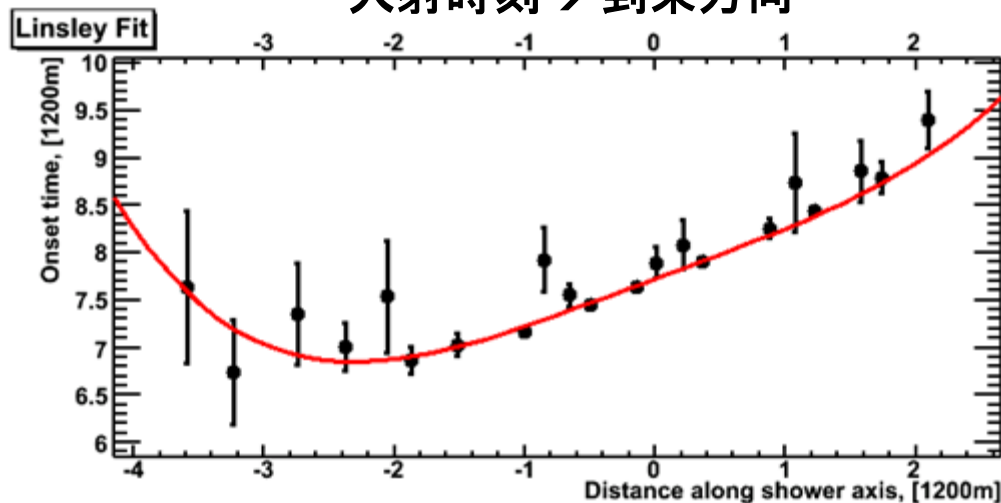
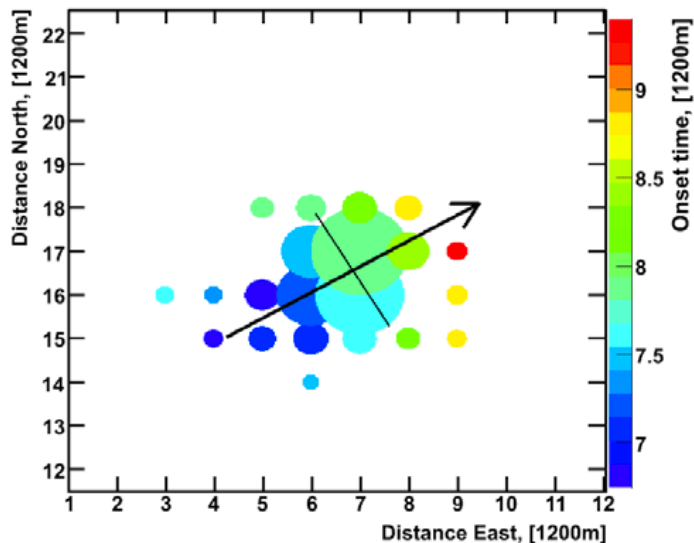


エネルギー推定

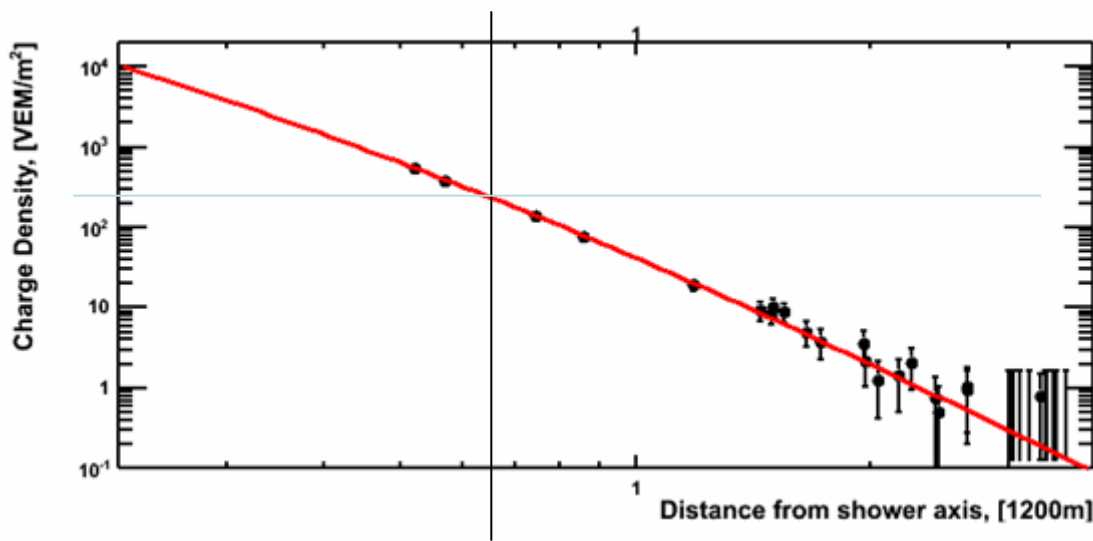


地表粒子検出器観測データ

2008/Jun/25 - 19:45:52.588670 UTC



入射時刻 → 到来方向



粒子の横分布の予想曲線とデータの
フィットで求める

$$\rho(r) \propto \left(\frac{r}{R_M}\right)^{-1.2} \left(1 + \frac{r}{R_M}\right)^{-(\eta-1.2)} \left\{1 + \left(\frac{r}{1000}\right)^2\right\}^{-0.6}$$

$$\eta = (3.97 \pm 0.13) - (1.79 \pm 0.62) (\sec \theta - 1)$$

→ (Primary Energy)

$r = 800m$

Telescope Array 宇宙線観測実験

解析用データ総量: 1か月当たり (@電力、情報 インフラ無し 立ち入り・工事 制限)



地表粒子検出器

X 507台

自立電源、無線通信

空気シャワーデータ
環境モニターデータ
検出器較正用データ

~15GB/month

街まで送り届
ければ何とか
なる。



蛍光望遠鏡

X 3か所

2TB/month

→ 望遠鏡施設にて PC、HDD に記録。
人力輸送 → 解析へ。

これは物理的
輸送しかない。

観測、データ転送システム (概要1)



X 507台

自立電源、無線通信

空気シャワー事象データ
環境モニターデータ
検出器校正用データ

~15GB/month

地表粒子検出器

検出器で記録されるデータ
波形データ
12bit 700 Hz 2ch x507台
total 2.5TB/month
連続記録
+環境計測(温度等)

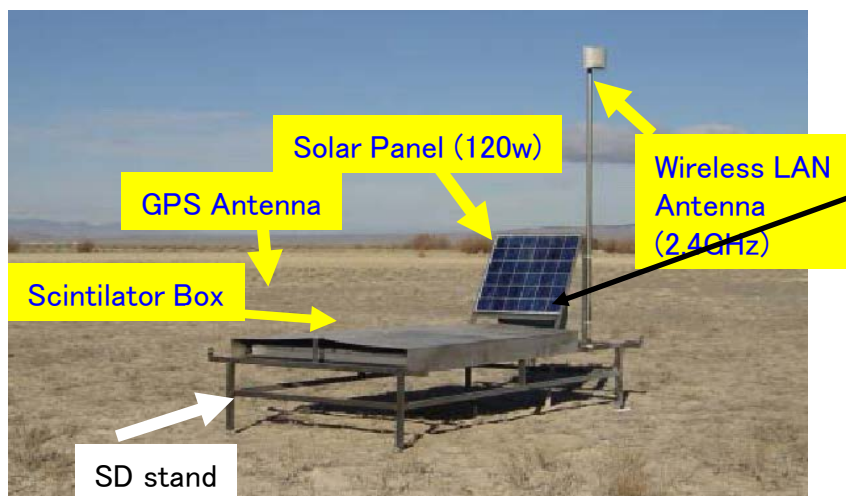
データ取得システム

事象選別
データ転送
稼働状況モニター

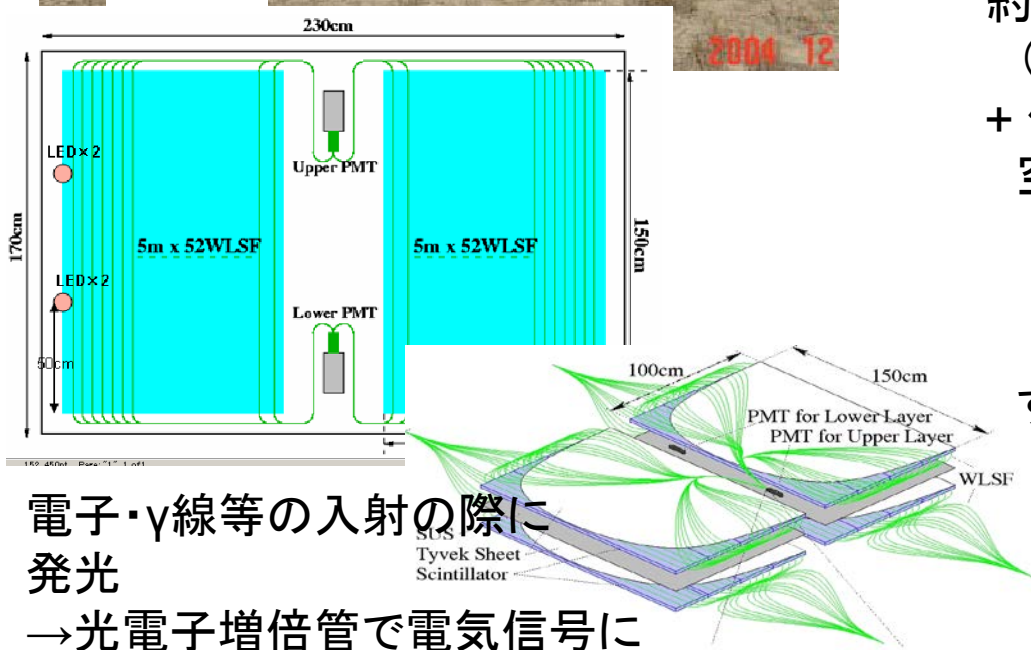
市街地まで転送

必要なデータのみ送信

観測、データ転送システム (観測機器)



- Solar cell+ Battery
- Wireless LAN (2.4GHz) communication
- GPS 1pps pulse are common clock for SDs.
- 50Msps FADC recording (12bit)



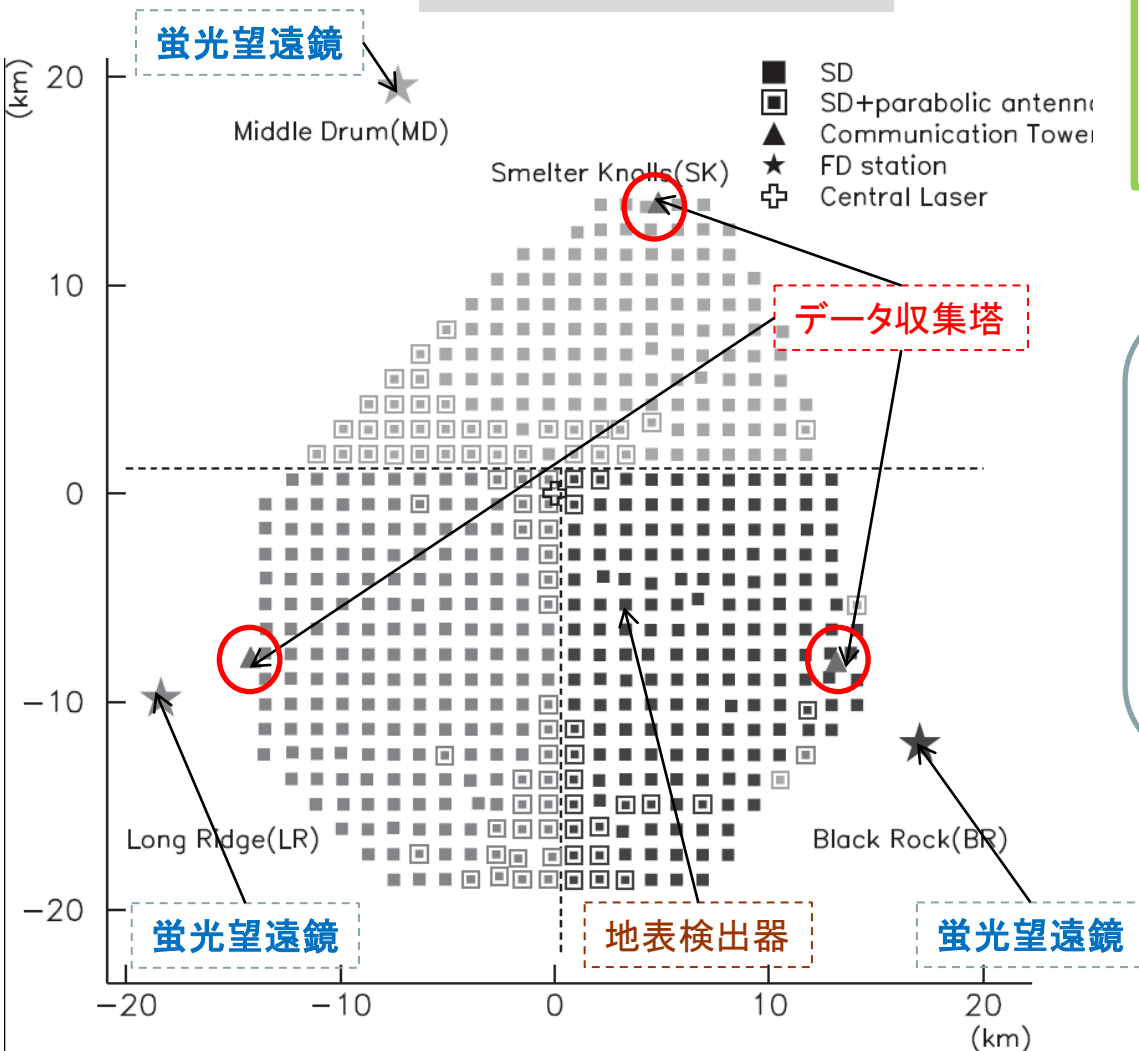
電子・ γ 線等の入射の際に
 発光
 →光電子増倍管で電気信号に

一台当たり
 約700Hzの環境放射線
 (大気ミュオン、電子等)による“ノイズ”
 + 低エネルギーの
 空気シャワー事象による信号 ~15Hz

すべての波形を収集する事は不可能
 →事象選別

観測、データ転送システム (概要2)

TA観測装置 構成図



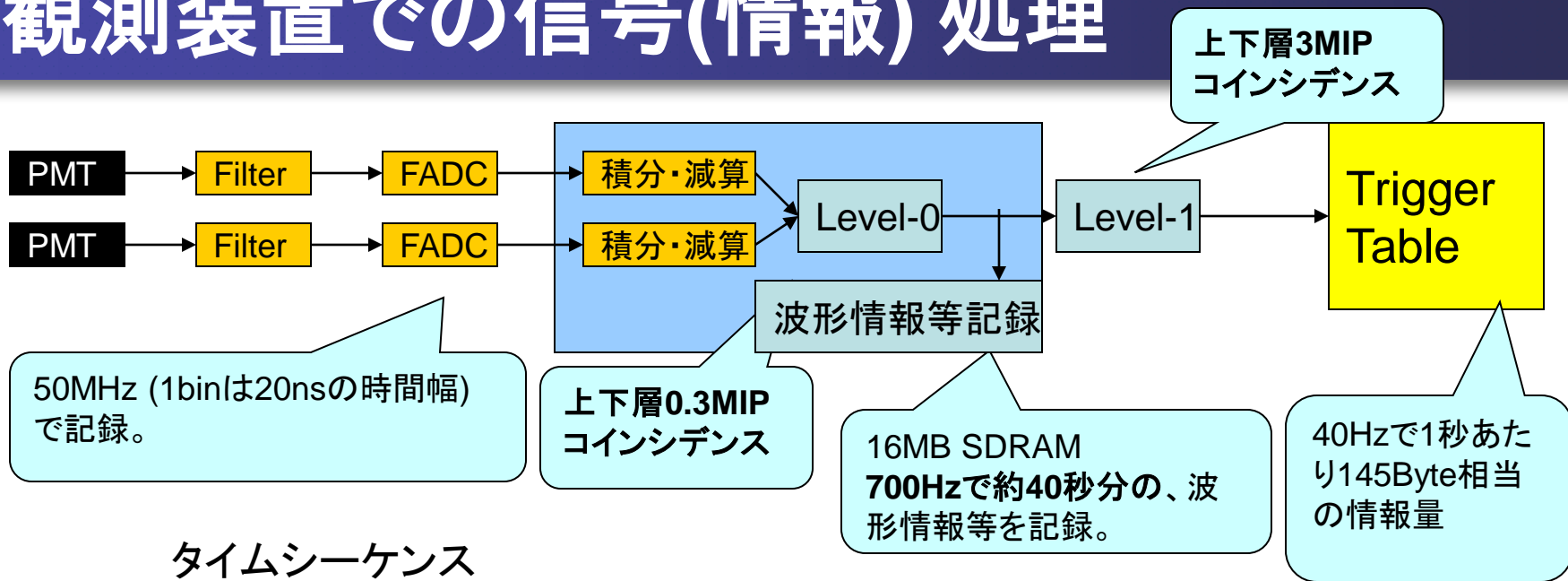
通信速度:

検出器と外部の通信速度~1Mbps
データ収集塔の通信速度~3Mbps
連続観測、欠測無を要求

- ① 3か所の通信塔を設置し、507台が通信する先を3か所に分散
- ② 3つの通信塔に空気シャワー事象判別能力を持たせる。
- ③ 個々の検出器にて、粗視化した情報を作成。装置から送り出す。

検出器個々にCPU、データ収集塔による判断を待つための十分なバッファ(メモリ)を搭載

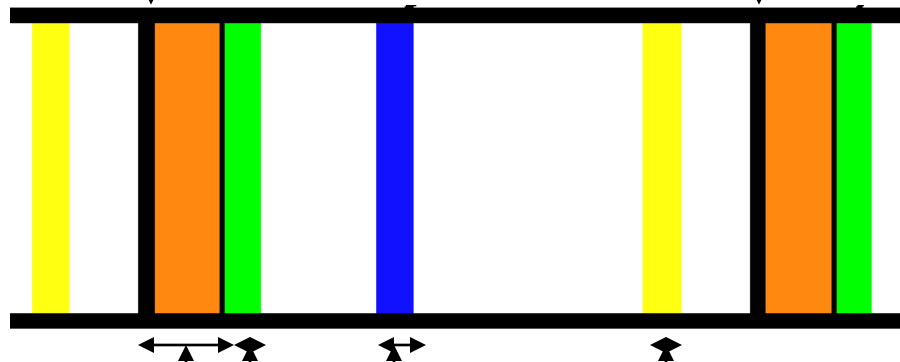
観測装置での信号(情報)処理



タイムシーケンス

PPS

PPS



トリガーテーブル生成
~60ms

波形情報収集 ~40ms

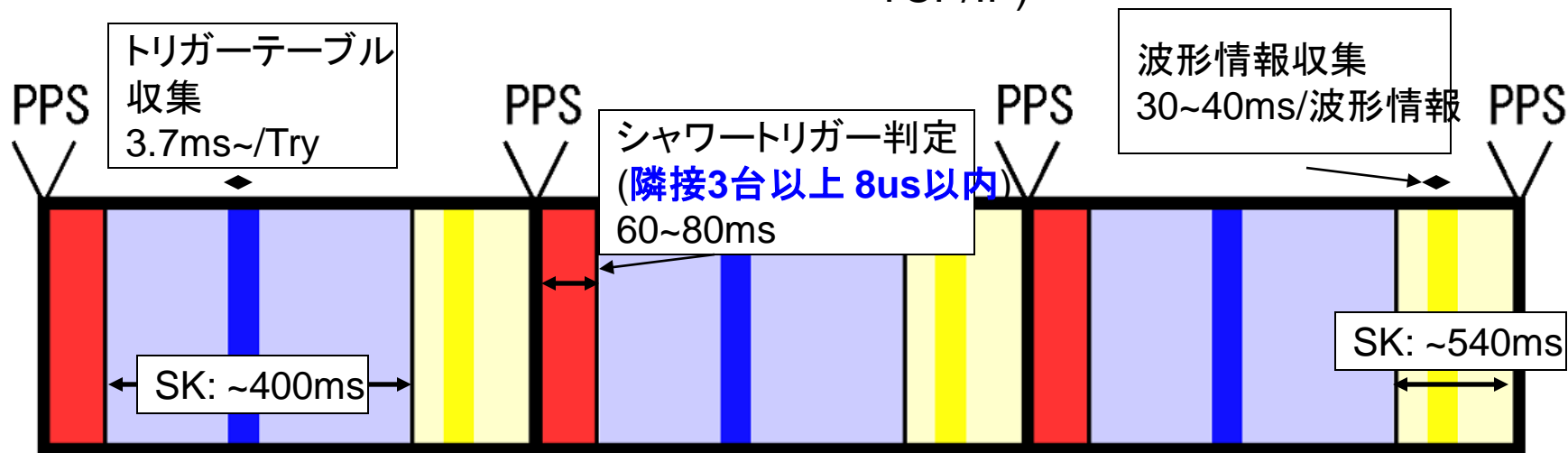
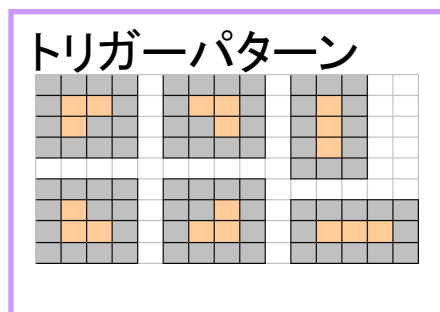
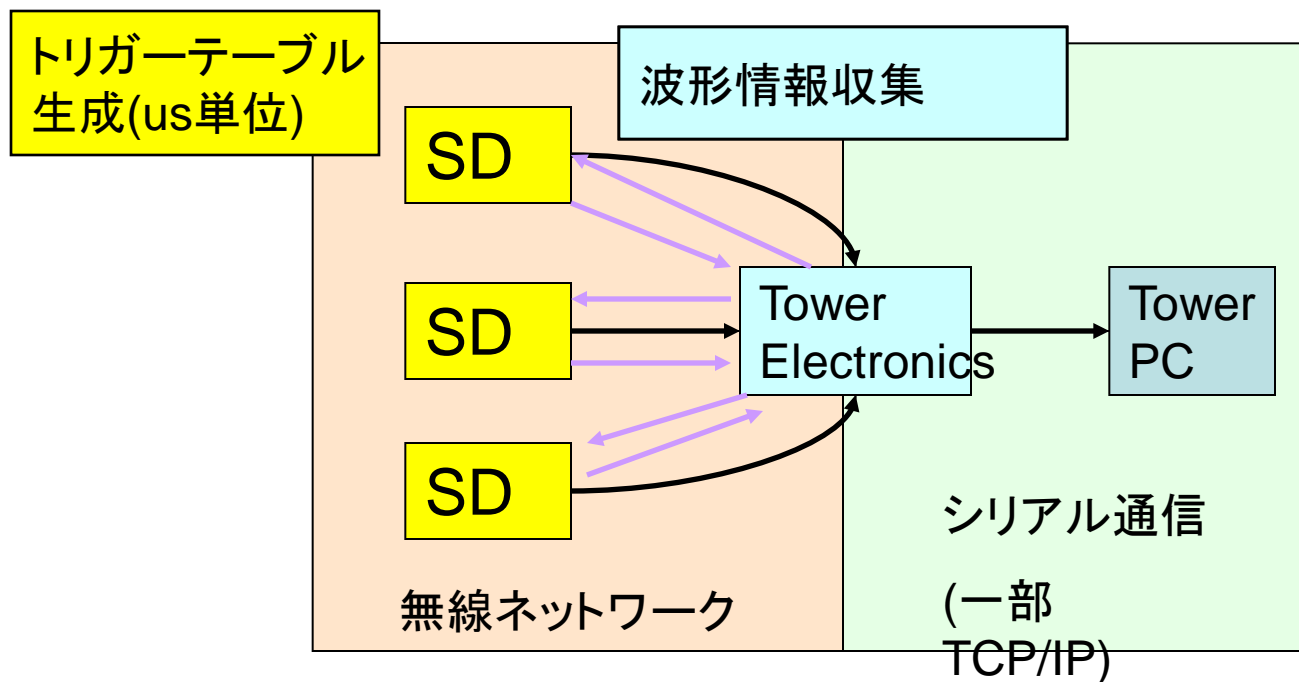
波形数探索

トリガーテーブル送信 ~3.7ms

大気ミュオンなどの雑多な宇宙線による
信号は送信する必要はない。

有意な信号に関する情報だけを
送信する

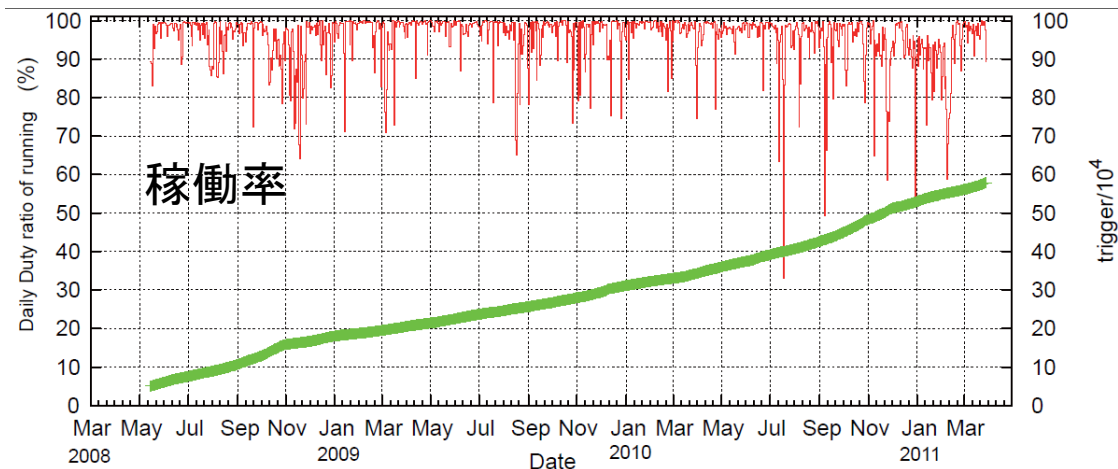
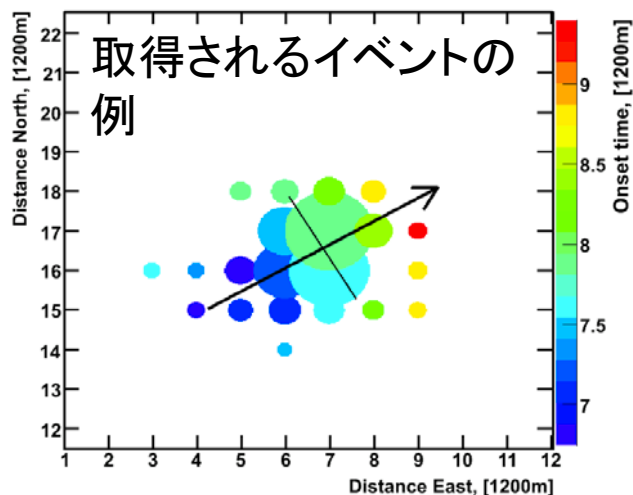
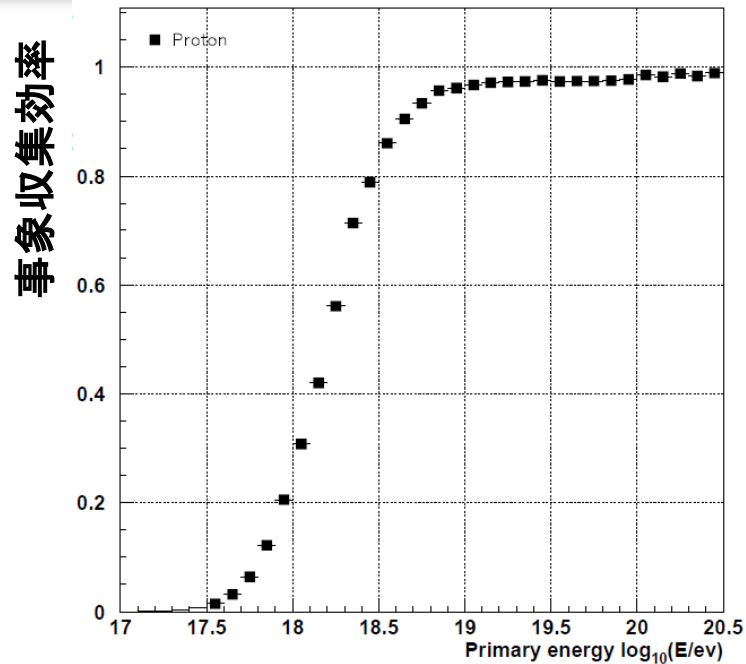
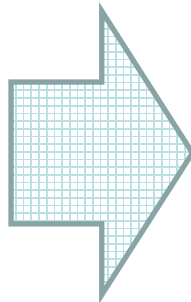
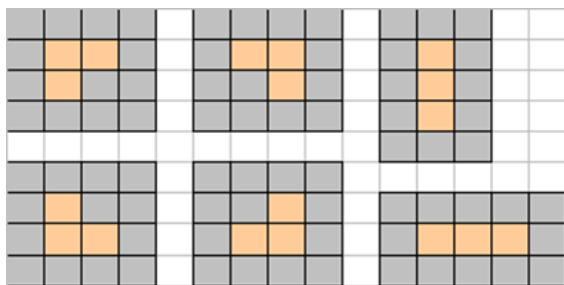
観測装置での信号(情報) 処理



観測装置 稼働実績

設計時

機器の設置間隔、波形収集のトリガー判定のためのパターン+信号の大きさを条件として計算機で収集効率のシミュレーション



観測、データ転送システム (通信塔)



通信塔本体とアンテナ群

通信塔の役割:

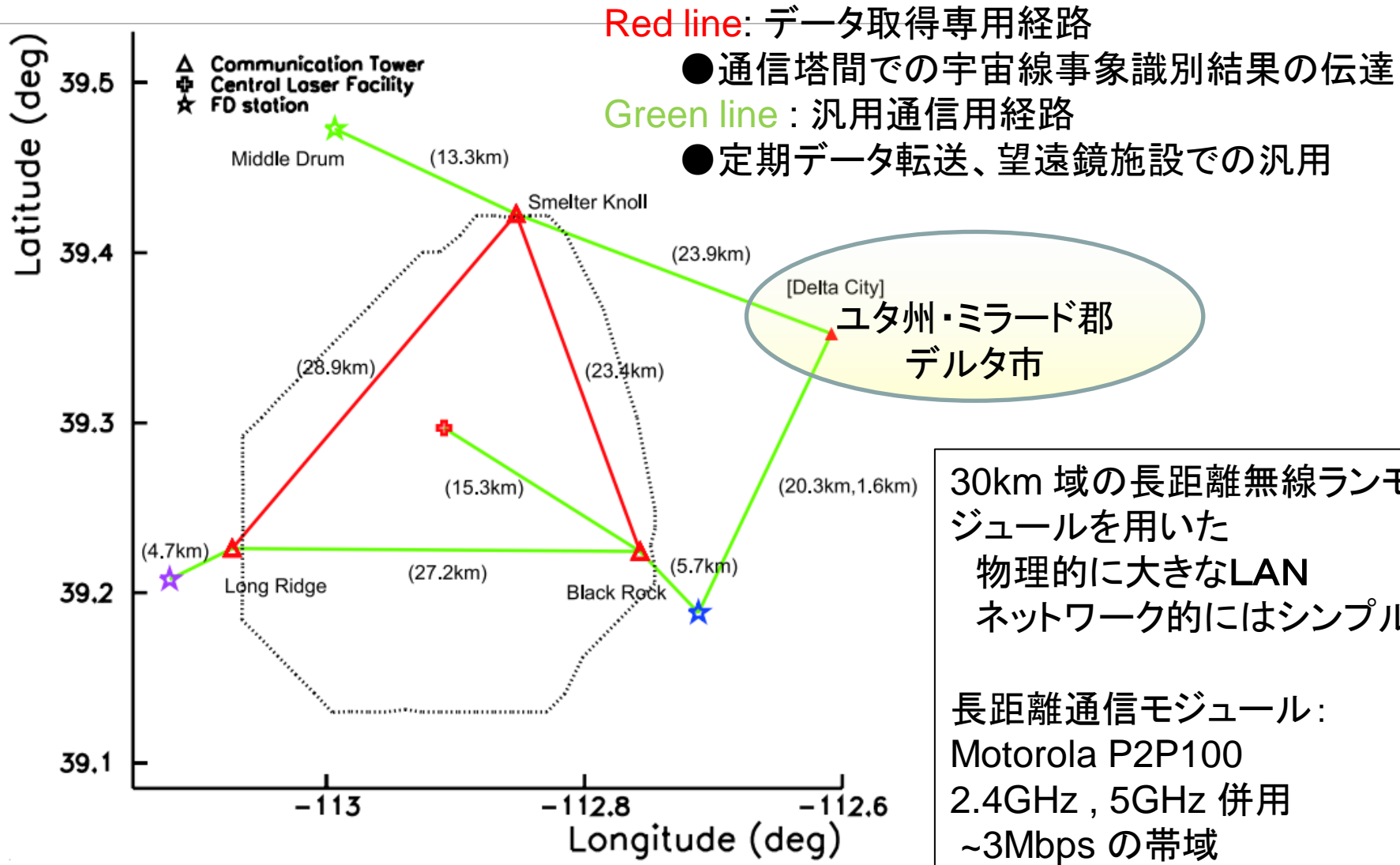
- ・地表の観測機器からのデータ収集
- ・望遠鏡施設のコントロールのためのネットワーク中継地点
- ・市街地へのデータ・情報輸送



バッテリーとネットワーク機器

Solar Panel
Kyocera
Battery Dinasty
長距離通信アンテナ
Motorola P2P100
2.4GHz/5GHz

サイト内ネットワーク回路



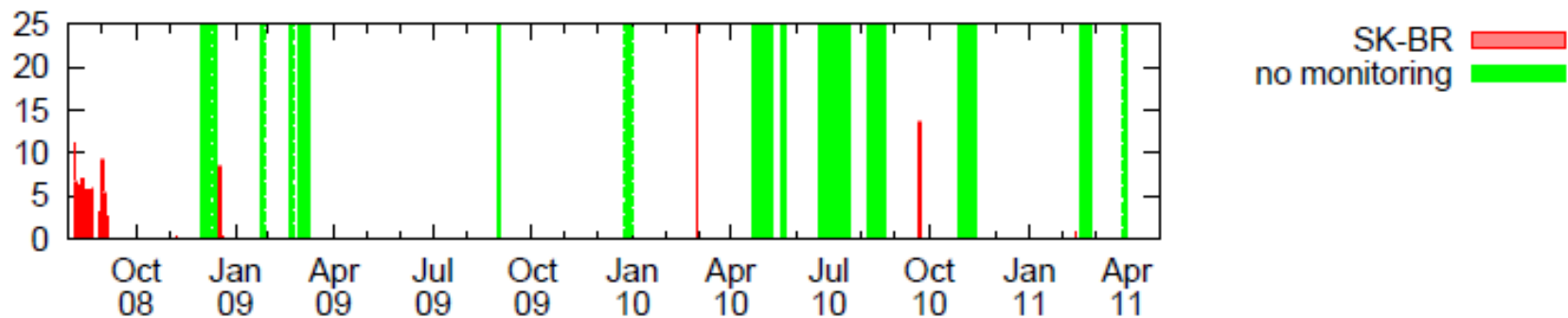
[Delta City]
ユタ州・ミラード郡
デルタ市

30km 域の長距離無線ランモジュールを用いた
物理的に大きなLAN
ネットワーク的にはシンプル

長距離通信モジュール:
Motorola P2P100
2.4GHz, 5GHz 併用
~3Mbps の帯域

観測、データ転送システム (通信塔)

通信塔間のパケットロスモニター (～2.5年分)



設置時、アンテナ間の干渉注意
運用時、悪天候注意必要

望遠鏡施設 遠隔操作中の モニタ画面

The monitoring interface includes:

- Weather condition logs:


```

            ----- MV status@LR -----
            2009/08/14 04:32:22
            CID INIT RAMP MAPFILE CONNECT POWER ch-Temp ERROR
            00 INIT UP camera00.shv CONNECT ON 04:31:55 NONE
            01 INIT UP camera01.shv CONNECT ON 04:32:09 NONE
            02 INIT UP camera02.shv CONNECT ON 04:32:22 NONE
            03 INIT UP camera03.shv CONNECT ON 04:29:45 NONE
            04 INIT UP camera04.shv CONNECT ON 04:29:58 NONE
            05 INIT UP camera05.shv CONNECT ON 04:30:12 NONE
            06 INIT UP camera06.shv CONNECT ON 04:30:25 NONE
            07 INIT UP camera07.shv CONNECT ON 04:30:39 NONE
            08 INIT UP camera08.shv CONNECT ON 04:30:52 NONE
            09 INIT UP camera09.shv CONNECT ON 04:31:05 NONE
            10 INIT UP camera10.shv CONNECT ON 04:31:19 NONE
            11 INIT UP camera11.shv CONNECT ON 04:31:32 NONE
            .. NOT_TRANS
            
```
- Easy DAQ log@LR:


```

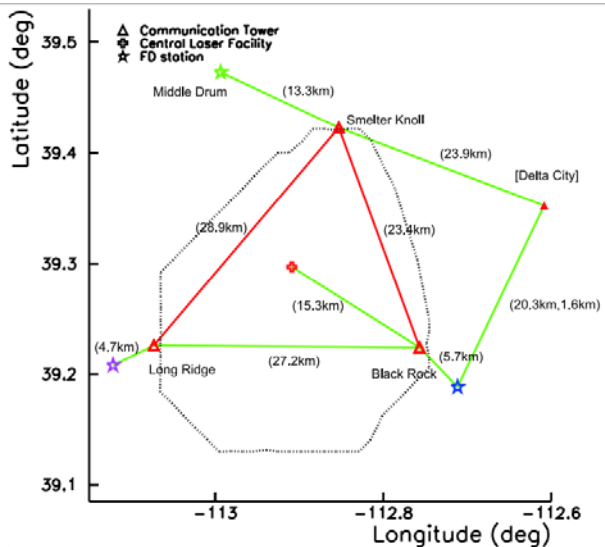
            ----- Easy DAQ log@LR -----
            :
            POWER: Fri Aug 14 04:03:39 UTC 2009
            0 | 80
            INIT: Fri Aug 14 04:04:50 UTC 2009
            HW: Fri Aug 14 04:18:08 UTC 2009
            INIT | 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 | - 1 |
            HW: Fri Aug 14 04:18:29 UTC 2009
            Lampo | 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 | - 1 |
            
```
- System logs:


```

            Error & Warning (2009/08/14 04:32:12):
            
```

データ収集システムの運転

地表検出器 稼働状況モニター



DAQに関連しない
緑のラインを使用:

不必要に GUI等の
使用はしない。

コマンドライン
→ 軽い

```

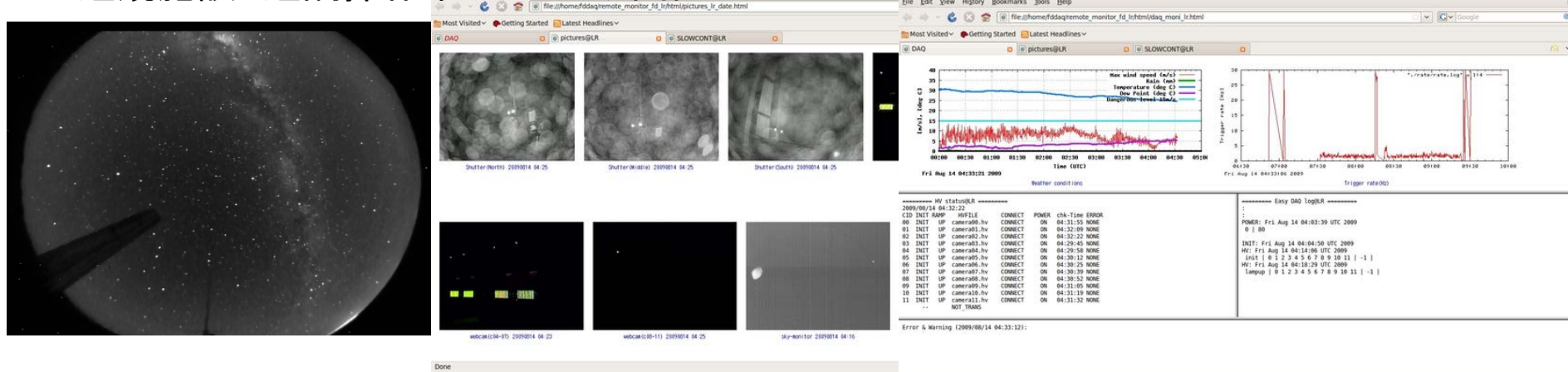
sdsys@crpc00.deltacrc.dip.jp: /home/sdys
Main Options  VT Options  VT Fonts
-----
Sun Dec 15 23:28:43 GMT 2013 : Tower status
* Update each 30 minuits
* terminal refresh each 30 second
-----
3) LRCT:
2013/12/15 23:00:48 @lrct
Filesystem      Size  Used Avail Use% Mounted on
tmpfs            63M   0  63M   0% /dev/shm
tmpfs            10M   28K  10M   1% /dev
/dev/sda1        15G  4.1G  9.4G  31% /mnt/usb

DAQ process list
2013/12/15 22:30:54 @lrct
root 14832 21.7 1.8 7612 2372 ? S 18:34 51:30 /root/hdaq/srcdbg/sd_daq_lr -rht3
root 14835 1.8 1.2 6308 1580 ? S 18:34 4:24 /root/hdaq/srcdbg/sd_daq_lr -rht3
root 14834 0.0 0.6 5800 796 ? S 18:34 0:00 /root/hdaq/srcdbg/sd_daq_lr -rht3
root 14835 0.0 0.2 4576 352 ? T 18:34 0:03 /root/hdaq/srcdbg/sd_daq_lr -rht3

latest data file
Dec 15 23:00 /mnt/usb/data/LR008491.Y2013

problem list
/LR008491.Y2013 :
Sun Dec 15 23:01:04 UTC 2013 @ lrct
# 5 sets of monitoring data searched
# posid  secnumErrors  trigErrors  commErrors
#-----
0312    0                0            5
0403    0                5            0
0805    0                0            3
0909    0                0            5
1006    0                0            5
    
```

望遠鏡施設 遠隔操作中の モニタ画面



まとめ

- ・ 電力 情報 基盤の無い所に観測網を構築。
→
各観測機器は自前で電力をまかなう
通信設備、経路も自分たちで設計設置
- ・ 各ラインは<3Mbps で大量データ転送は難しい,したがって
データの転送量を必要最小にするため
記録事象の粗視化情報を送信、
事象選別の後、詳細データを転送する。
- ・ 長期間(～10年)稼働させるには、
通信塔そのものと、市街地から通信塔への
安定した通信が重要。



2013/12/17

設置時の経験から:

データ取得スキームの確定と
実験で使用するハードウェアの仕様決定とはなかなか切り離せない

実際には両方が同時に定まる事はない、
また、実際の設置の最中に設置環境による制限が実験の想定しているものと異なる事もある。

(土地管理局による作業制限、スケジュール、等)

→
開発項目の少ない、機器を用いる部分、
基幹となるデータ転送経路は
早めに確立しておく。

これは、データ取得システムの構築の際に非常に重要だった。

物理目標

- 極高エネルギー粒子($\sim 10^{20}$ eV)の発生機構、(発生源)の特定

→ スペクトル、到来方向、化学組成から迫る

- 際立ったソース!?: 加速天体特定、
→ 粒子線天文学可能性

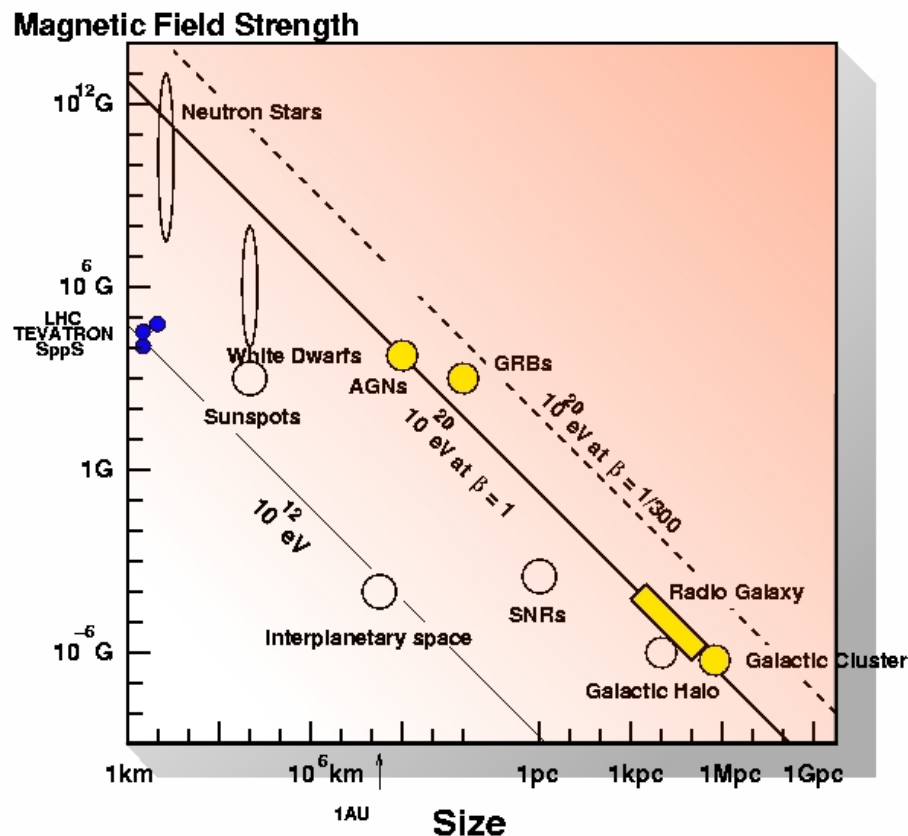
- 銀河団等の
大規模構造との相関!?:
銀河間磁場強度

→ 生成源密度, 加速天体種の推定

- 空気シャワー粒子の観測から、
陽子 Total cross section..etc

→

超高エネルギー原子核相互作用の
モデル制限, Elab > LHC 加速器



理論的に予想される加速天体候補

加速候補天体

加速できる最大のエネルギー
 \propto 銀河の大きさ \times 磁場の強さ

→ **大きい** or **磁場が強い** 天体
 ↑ 天然加速器

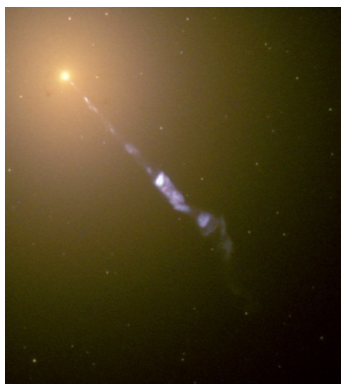
例えば

* 活動銀河(AGN)

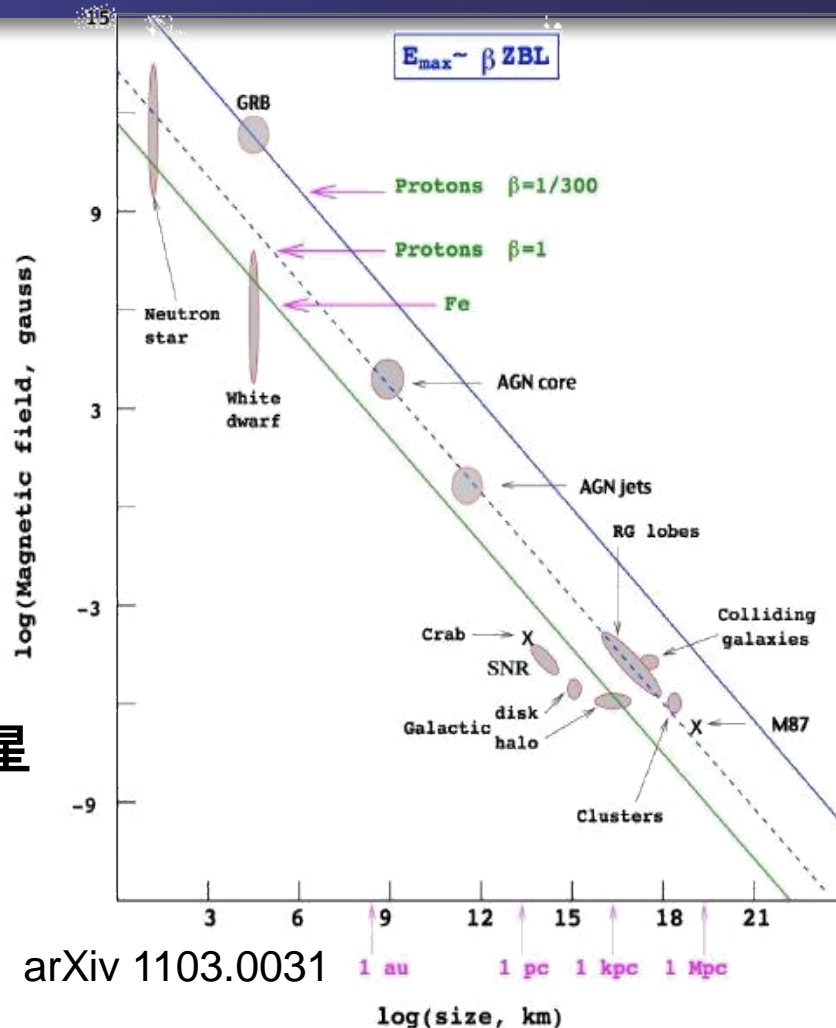
e.g. クェーサー、セイファート銀河

* マグネター

高エネルギーの電磁波を出す中性子星



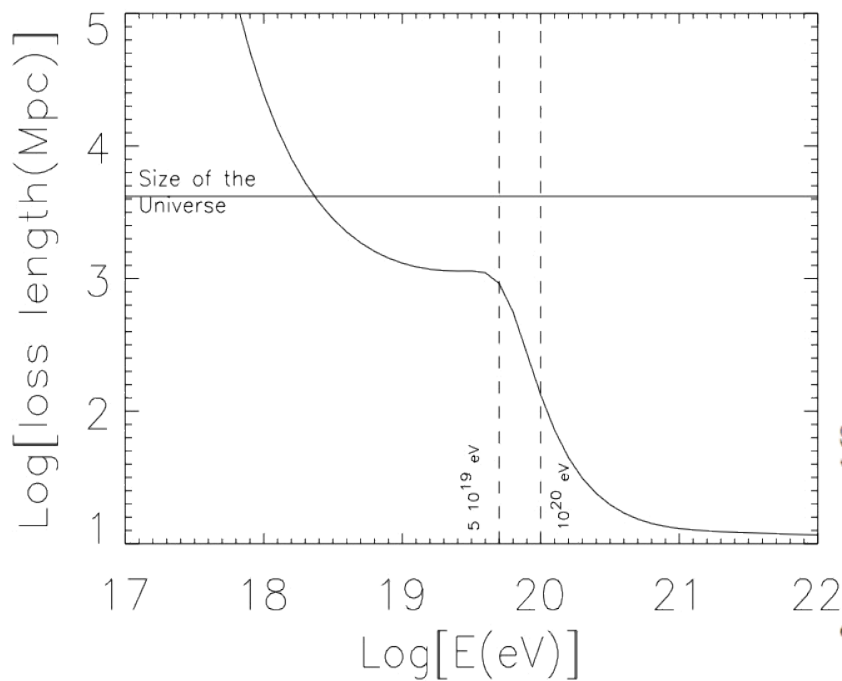
AGN Jet



Hillasダイアグラム

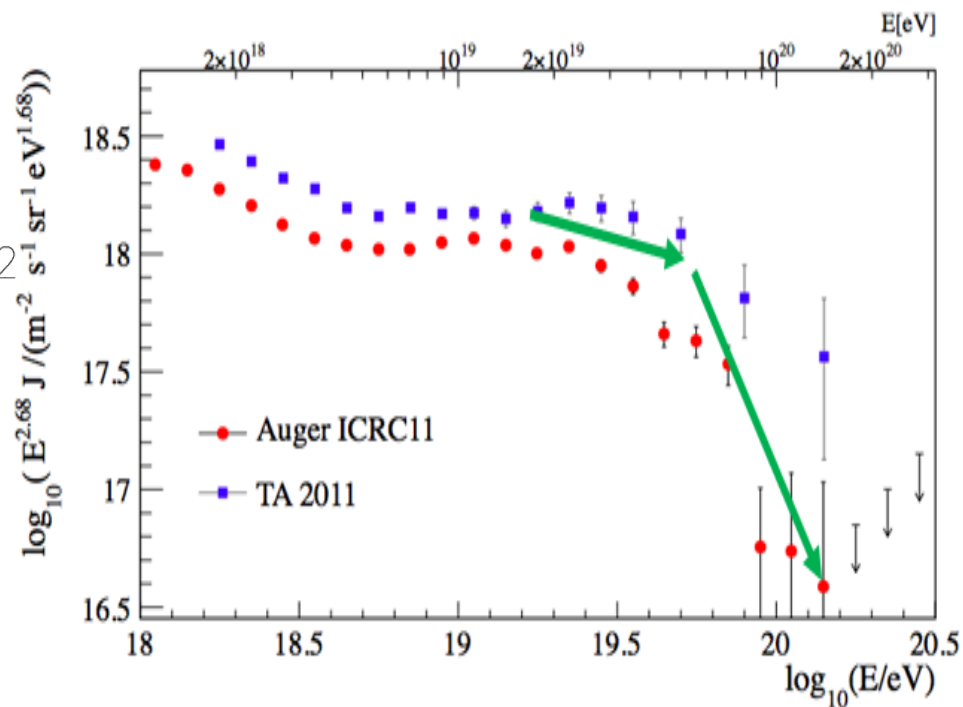
= 加速候補天体 早見表

GZK効果



横軸 エネルギー
縦軸 エネルギーを失うまでの距離

エネルギーと到来頻度



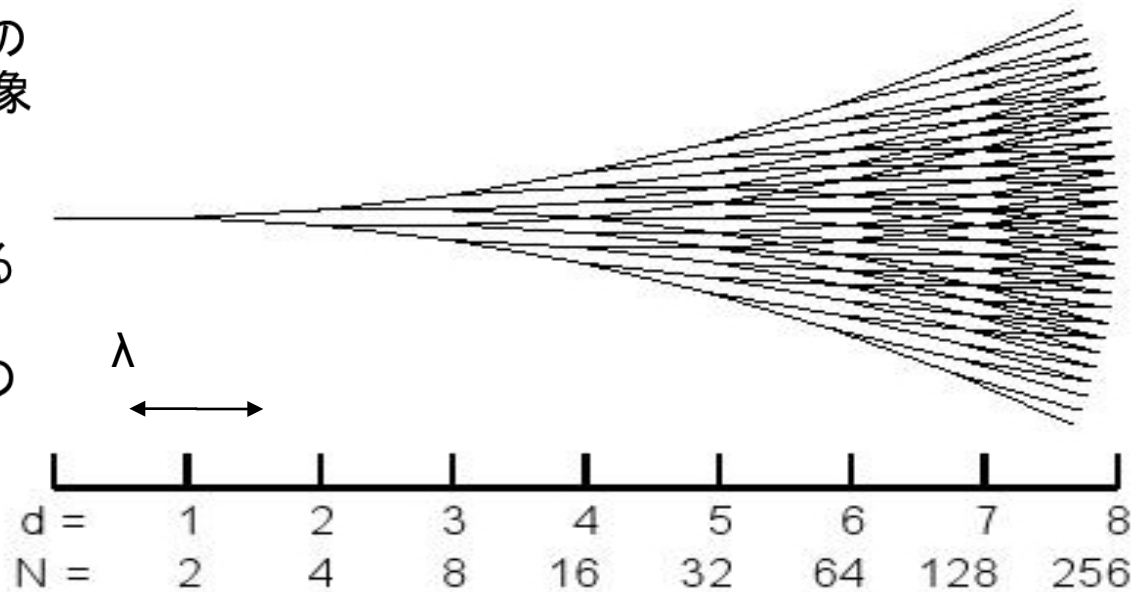
空気シャワー現象

電磁カスケード: 高エネルギーの電子がねずみ算式に増える現象

自由行程: λ
分裂でエネルギーは等分される

E_c : カスケードを起こせる最低のエネルギー

$$N_{max} = \frac{E_p}{E_c}$$



ここまでの反応回数を n とする $N_{max} = 2^n$ だから、

$$n = \log_2 \frac{E_p}{E_c}$$

$$X_{max} = \lambda n$$

$$X_{max} \propto \log_2 E_p$$

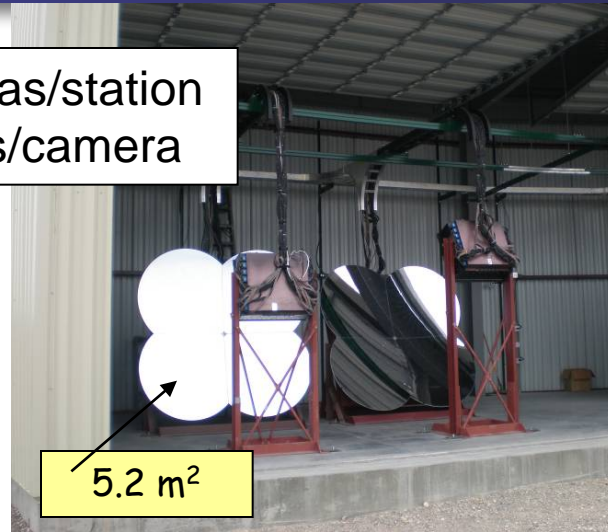
大氣螢光望遠鏡

From HiRes

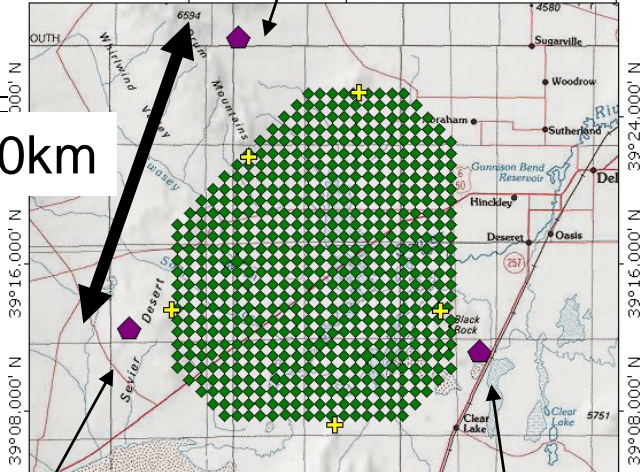
Middle Drum



14 cameras/station
256 PMTs/camera



TOPO! map printed on 07/12/04 from "StakeJun04-01.tpo" and "Untitled.tpg"
113°03.000' W 112°52.000' W NAD27 112°33.000' W



~30km

New FDs

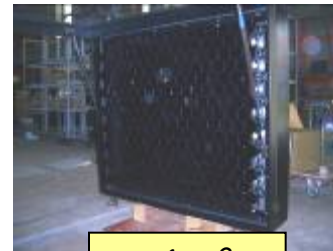
256 PMTs/camera
HAMAMATSU R9508
FOV~15x18deg
12 cameras/station



6.8 m²

Long Ridge

Black Rock Mesa



~1 m²

113°03.000' W 112°52.000' W
with TOPO! © 2002 National Geographic