

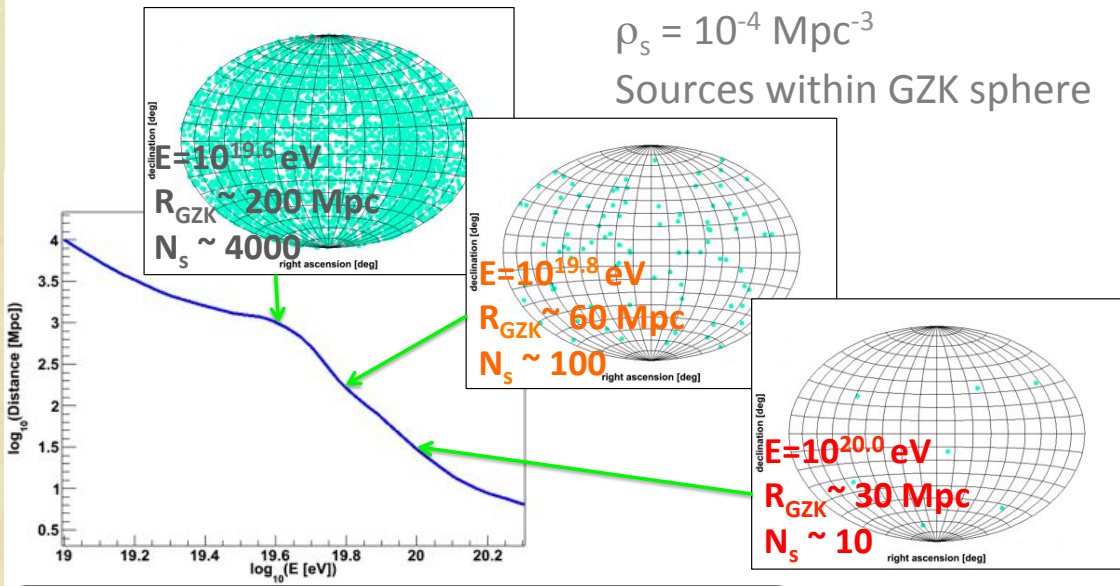
電波による宇宙線観測のR&D

IKEDA Daisuke
ICRR, University of Tokyo

UHECR観測の将来計画

GZKエネルギー以上に特化した大規模検出器！

高エネルギー = 起源天体の制限



地表検出器

- 地表での横方向分布を観測
- 24時間安定した観測
- MCに依存したエネルギー測定

TA-SD

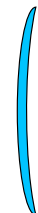
大規模SDアレイ?

10,000 SDs
Spacing = 2.0km
→ 39,200 km²

大気蛍光望遠鏡

- 縦方向発達を観測
- カロリメトリックなエネルギー測定
- Duty ~10%

Fresnel lens
30° x 30° fov
1 m²



8"-10" Fov +
electrons

Filter

大規模FDアレイ?



電波による宇宙線観測

TA-2

TA x 57.8

Auger x 13.1

電波による空気シャワー観測

電波による観測

- Duty 100%
- 大気中での減衰はほとんど無い
- 安価(?)

Askaryan effect

- チェレンコフ効果
- 大気中ではその他の電波が優勢
- 電波に対して透明な媒質(氷、岩塩、月面)が対象

Molecular Brems.

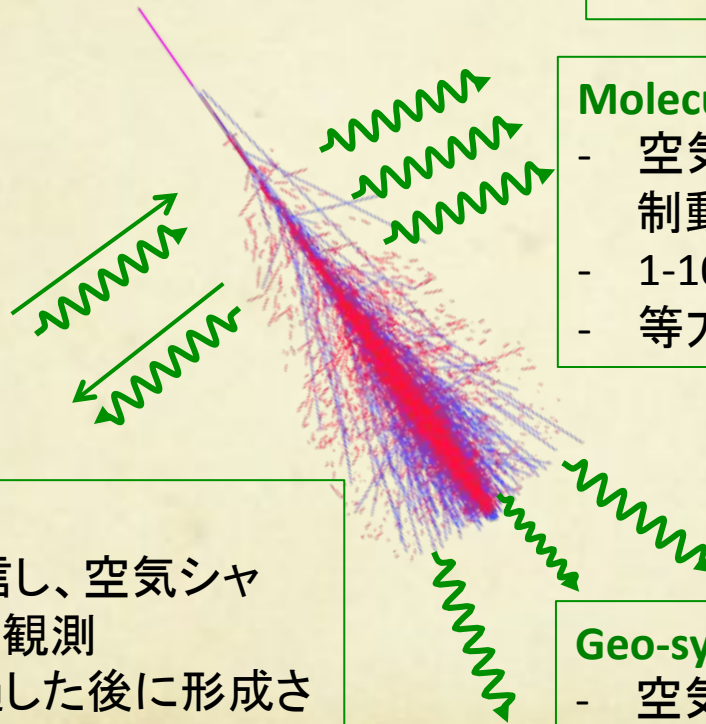
- 空気シャワー粒子($<10\text{eV}$)が分子で制動放射を起こして電波を放出
- 1-10 GHz
- 等方的な放射 = 縦方向発達の撮像

Bi-static radar

- 自発的に電波を送信し、空気シャワーからの反射波を観測
- 空気シャワーが通過した後に形成される電子柱がターゲット
- $\sim 50\text{MHz}$

Geo-synchrotron radiation

- 空気シャワー粒子が地磁気に巻き付いてシンクロトン放射
- 10-100 MHz
- シャワー進行方向にBeaming



電波による空気シャワー観測

電波による観測

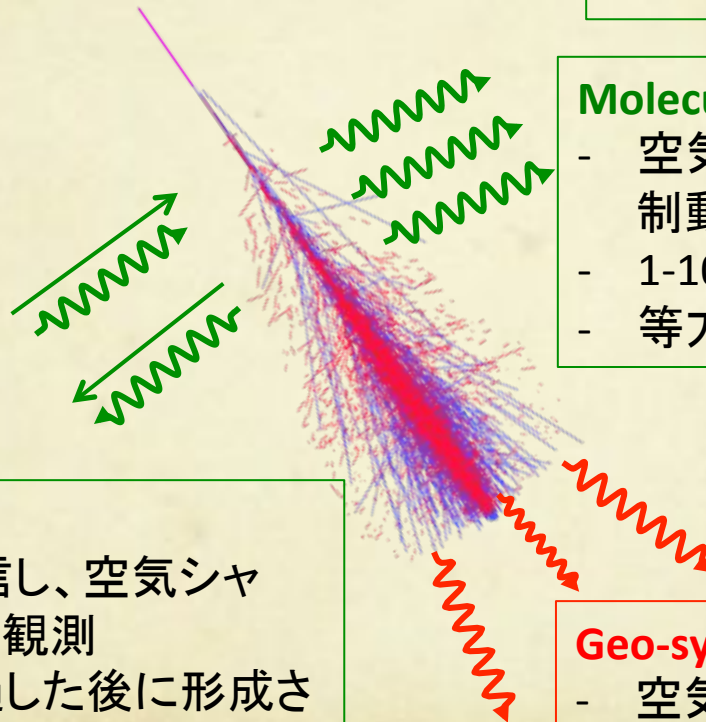
- Duty 100%
- 大気中での減衰はほとんど無い
- 安価(?)

Askaryan effect

- チェレンコフ効果
- 大気中ではその他の電波が優勢
- 電波に対して透明な媒質(氷、岩塩、月面)が対象

Molecular Brems.

- 空気シャワー粒子(<10eV)が分子で制動放射を起こして電波を放出
- 1-10 GHz
- 等方的な放射 = 縦方向発達の撮像



Bi-static radar

- 自発的に電波を送信し、空気シャワーからの反射波を観測
- 空気シャワーが通過した後に形成される電子柱がターゲット
- ~50MHz

Geo-synchrotron radiation

- 空気シャワー粒子が地磁気に巻き付いてシンクロトン放射
- 10-100 MHz
- シャワー進行方向にBeaming

Geo-Syncrotron

電波発生メカニズムの理解へ

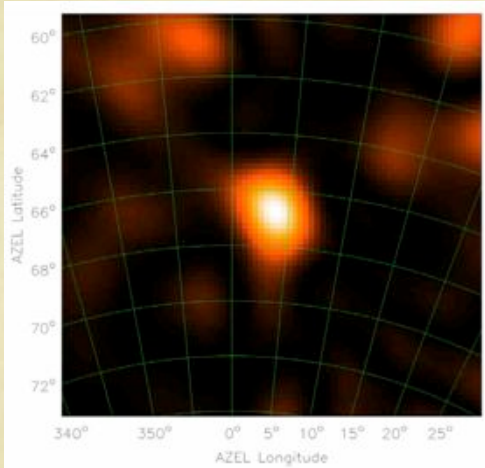
LOPES
LOFAR
CODALEMA
AERA
EASIER
RASTA...



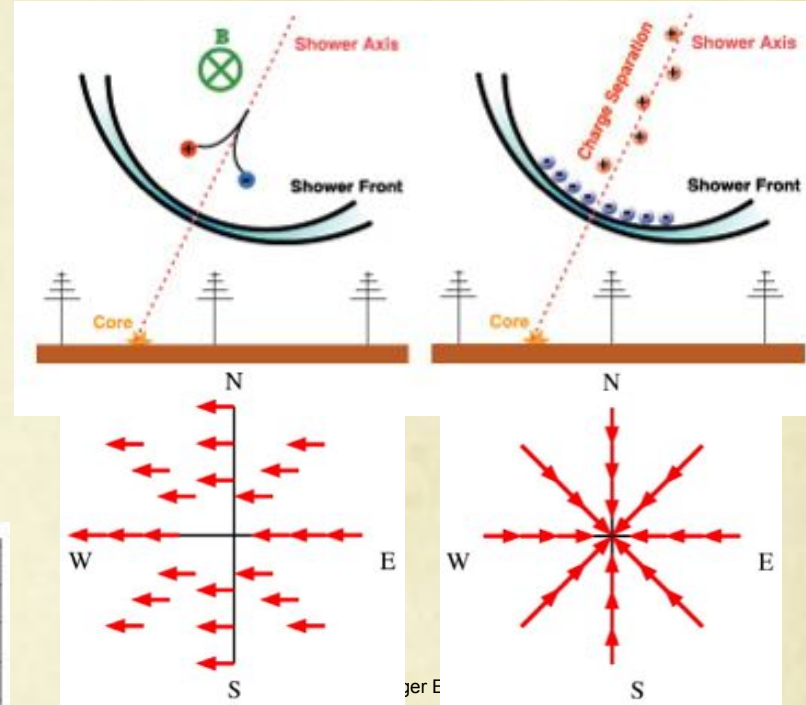
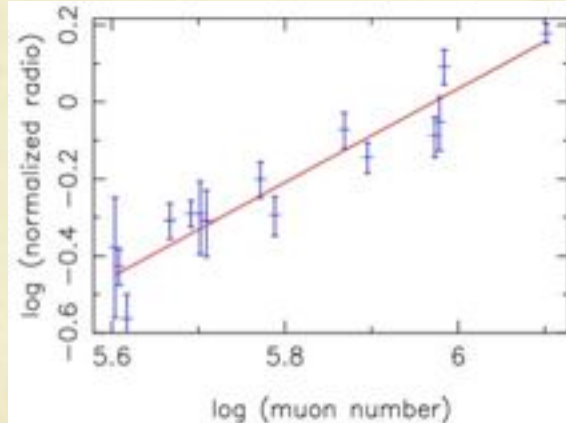
2005年 LOPESによる観測報告

LOPES, Nature 435, 313- (2005)

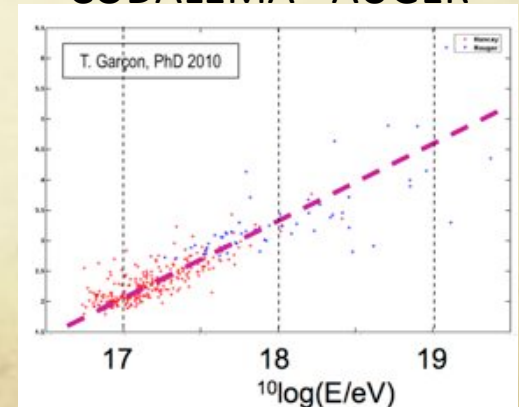
電波イメージ
(干渉計による像合成)



電波強度 - 粒子数
(LOPES - KASCADE)



CODALEMA - AUGER



観測成功

電波発生メカニズムの理解

(ただし検出器を密に置く必要があり、大規模検出器には不適)

電波による空気シャワー観測

電波による観測

- Duty 100%
- 大気中での減衰はほとんど無い
- 安価(?)

Askaryan effect

- チェレンコフ効果
- 大気中ではその他の電波が優勢
- 電波に対して透明な媒質(氷、岩塩、月面)が対象

Molecular Brems.

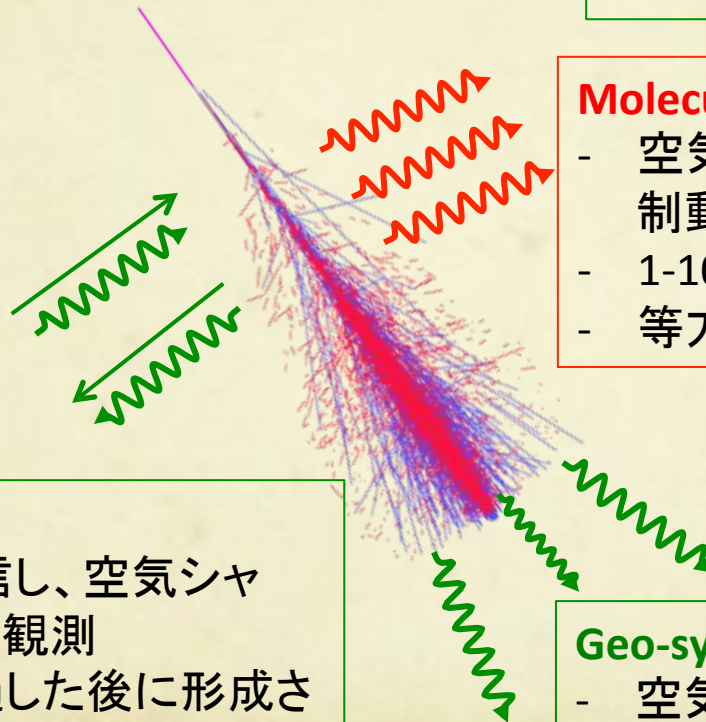
- 空気シャワー粒子($<10\text{eV}$)が分子で制動放射を起こして電波を放出
- 1-10 GHz
- 等方的な放射 = 縦方向発達の撮像

Bi-static radar

- 自発的に電波を送信し、空気シャワーからの反射波を観測
- 空気シャワーが通過した後に形成される電子柱がターゲット
- $\sim 50\text{MHz}$

Geo-synchrotron radiation

- 空気シャワー粒子が地磁気に巻き付いてシンクロトン放射
- 10-100 MHz
- シャワー進行方向にBeaming



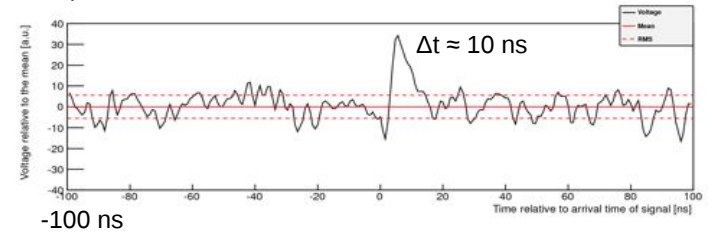
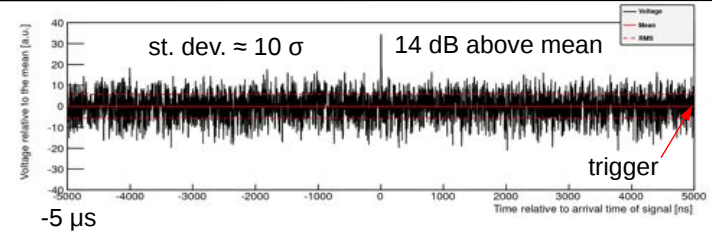
AMBER
MIDAS
CROME
OCU
MAYBE...



Molecular Brems.

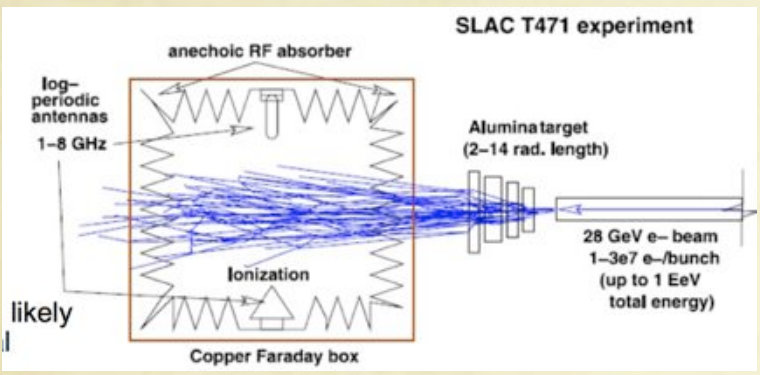
KASCADEとの同期信号(CROME)

9×10^{16} eV, 3.8°, 126 m CROME

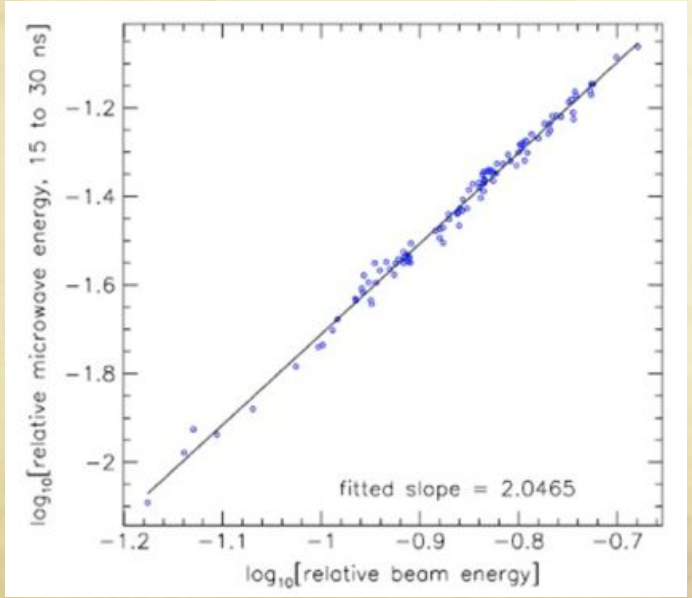


R. Šmída – Microwave emission from EAS as seen by CROME 7/11

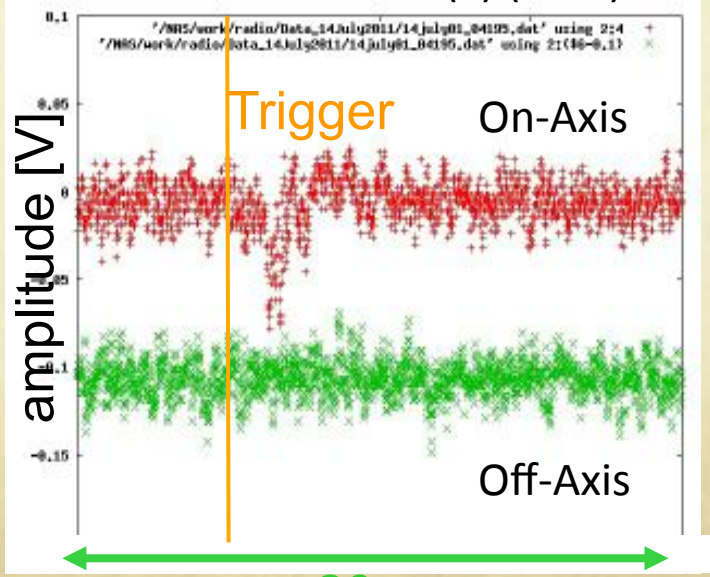
MAYBEによるビーム試験@SLAC



ビーム強度 - 電波強度



SDとの同期信号(?) (OCU)



ビーム試験による
原理実証
観測成功(?)

電波による空気シャワー観測

電波による観測

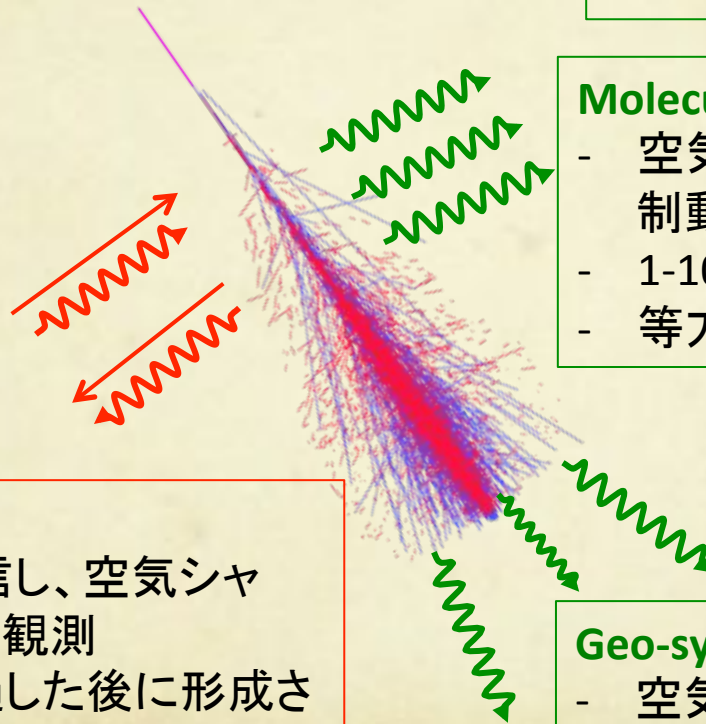
- Duty 100%
- 大気中での減衰はほとんど無い
- 安価(?)

Askaryan effect

- チェレンコフ効果
- 大気中ではその他の電波が優勢
- 電波に対して透明な媒質(氷、岩塩、月面)が対象

Molecular Brems.

- 空気シャワー粒子($<10\text{eV}$)が分子で制動放射を起こして電波を放出
- 1-10 GHz
- 等方的な放射 = 縦方向発達の撮像



Bi-static radar

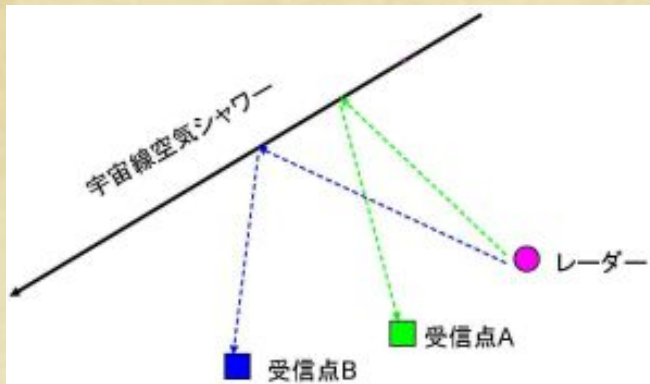
- 自発的に電波を送信し、空気シャワーからの反射波を観測
- 空気シャワーが通過した後に形成される電子柱がターゲット
- $\sim 50\text{MHz}$

Geo-synchrotron radiation

- 空気シャワー粒子が地磁気に巻き付いてシンクロトン放射
- 10-100 MHz
- シャワー進行方向にBeaming

Bi-static Radar

多地点同時流星観測プロジェクト

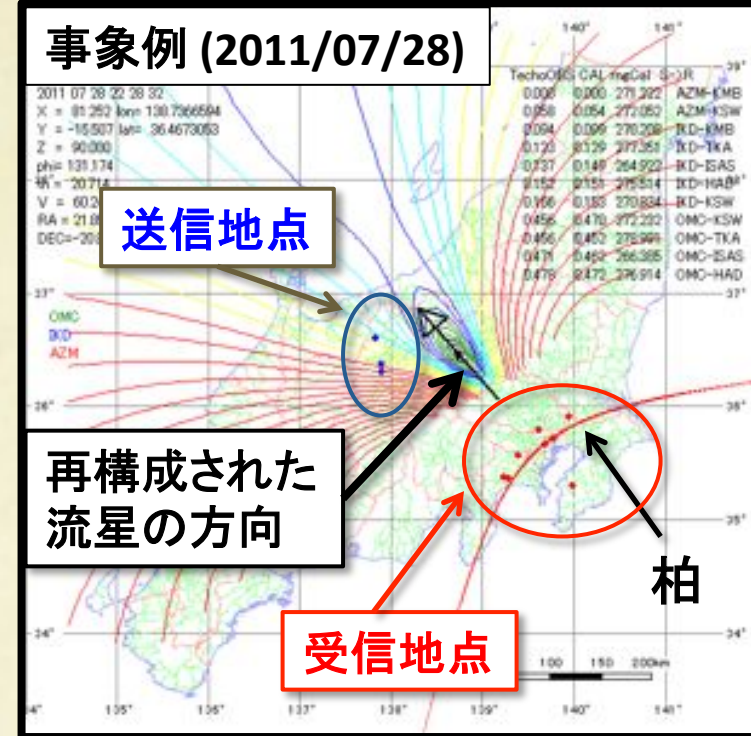


•50MHz帯の電波を送信し、空気シャワー通過後に形成される電子柱における反射(電波エコー)を受信

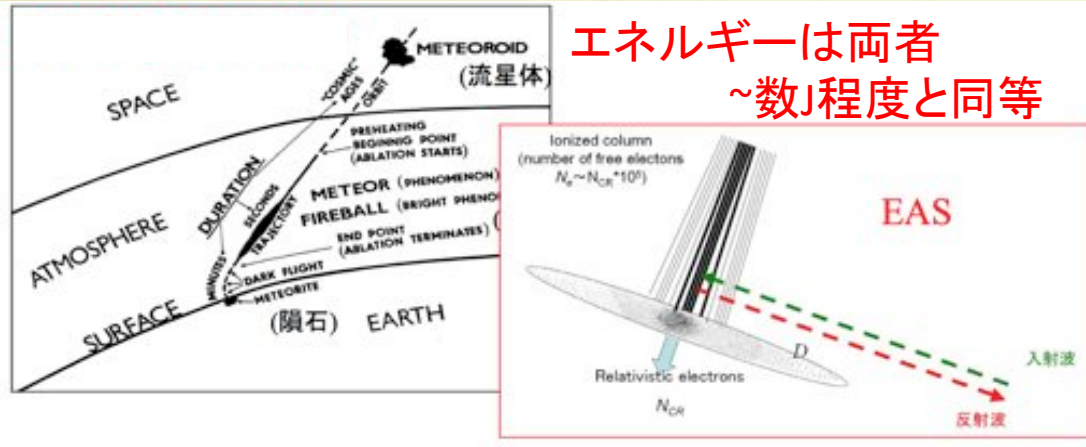
$$P_R = P_T \cdot \left(\frac{G_T}{4\pi R_T^2} \right) \cdot \sigma \cdot \left(\frac{G_R}{4\pi R_R^2} \right) \cdot \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right)$$

流星観測において実績有

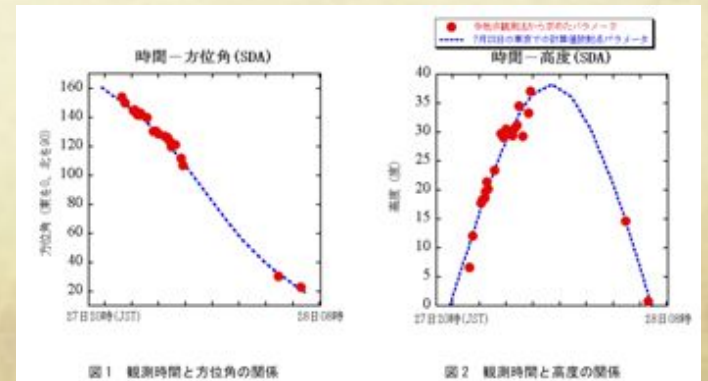
流星: 高度~100km, ~70km/s, ~数 μ gの塵



再構成された方向と放射点(2009)



EAS: 高度~数km, 光速, 原子核(p~Fe)



The TARA Project

People: M. Abu Bakr Othman, C. Allen, **J. Belz**,
D. Besson, B. Farhang-Boroujeny, D. Ikeda,
S. Kunwar, J.P. Lundquist, I. Kravchenko,
S. Larson, I. Myers, T. Nakamura, J. S. Rankin,
H. Sagawa, P. Sokolsky, H. Takai, T. Terasawa,
G.B. Thomson



(BNL, Kansas, Nebraska,
NIPR, ICRR, Utah, Utah State)



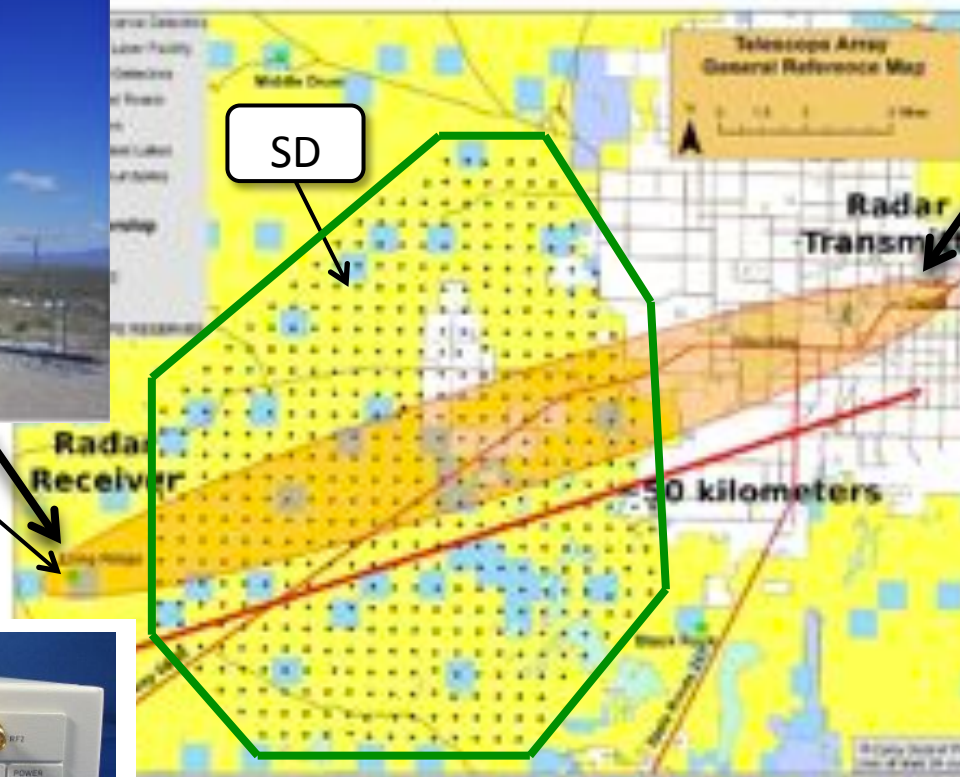
and the Telescope Array Collaboration

Support: US NSF-PHY, NSF-MRI
Utah VP for Research, Dean College of Science
Japan Grants-in-Aid for “Exploratory Research”
Salt Lake City TV stations KUTV, ABC4

TARA計画

Receivers
(Log-periodic antenna x4)

Transmitter (6m Yagi)



FD

Trigger: Self / FD



DAQ: ソフトウェアラジオ USRP2

- 12.5MHz sampling rate
- FPGAによる制御

TA実験のSD/FDとの同期試験で
空気シャワー観測実証を目指す！

米国アナログTV 2ch
54.1MHz, 2kW

期待される信号

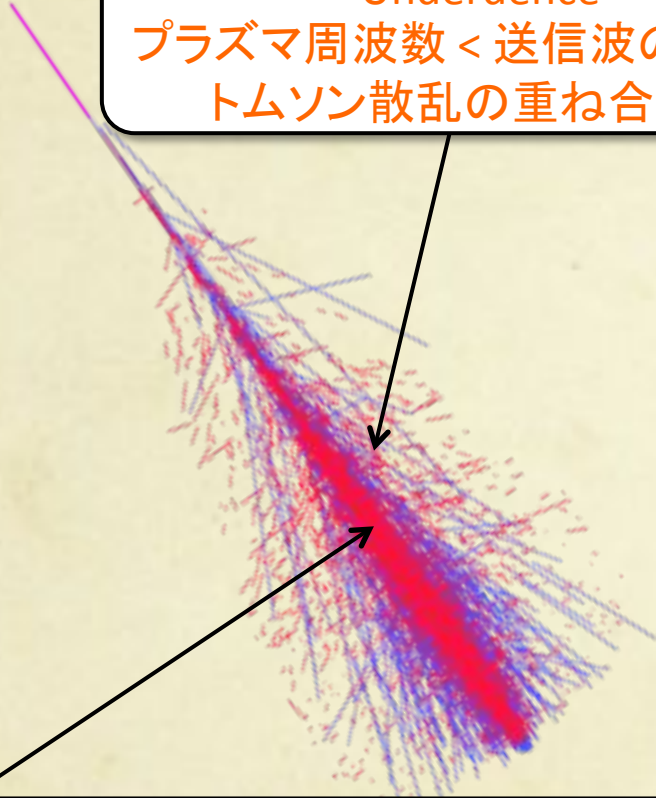
プラズマ周波数:

$$\nu = (\text{Ne } e^2 / \text{PI Me})^{0.5}$$

$$= 8.98 \times 10^3 (\text{Ne})^{0.5} \text{ Hz}$$

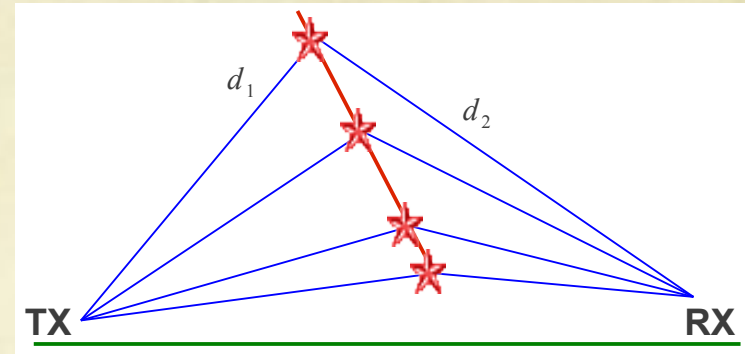
$$3.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-3} \rightarrow 55 \text{ MHz}$$

“Underdence”
プラズマ周波数 < 送信波の周波数
トムソン散乱の重ね合わせ



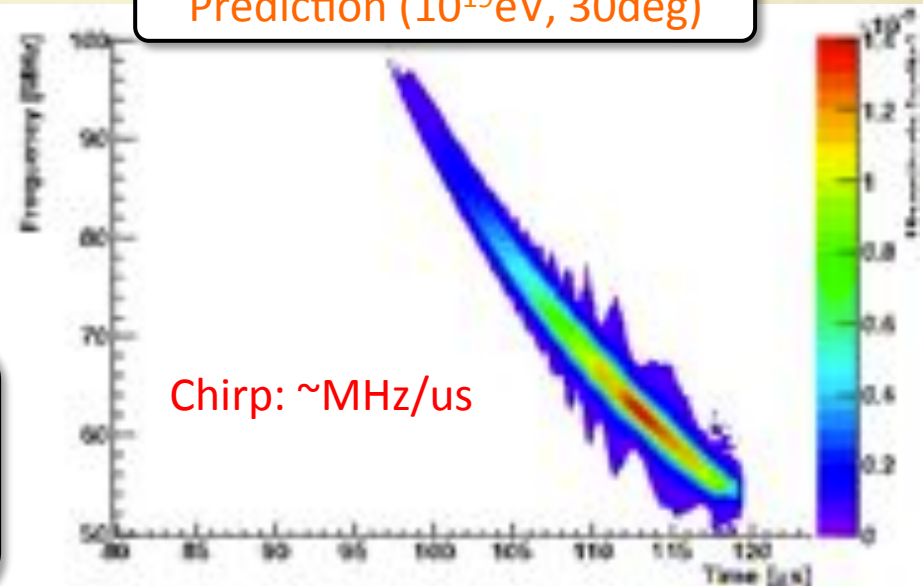
“Overdence”
プラズマ周波数 > 送信波の周波数
金属表面のような反射
最大発達点付近、中心 ~1cm 程度が相当？

“Chirp”信号



反射点が光速で移動 → ドップラー効果
(電子寿命は ~100ns @ 10km 程度)

Prediction (10¹⁹eV, 30deg)

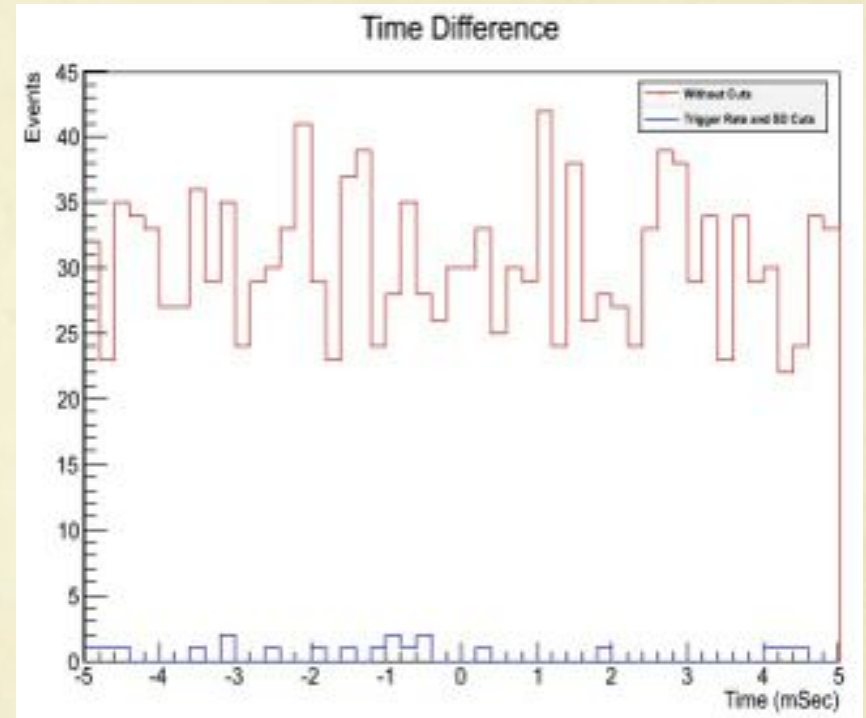
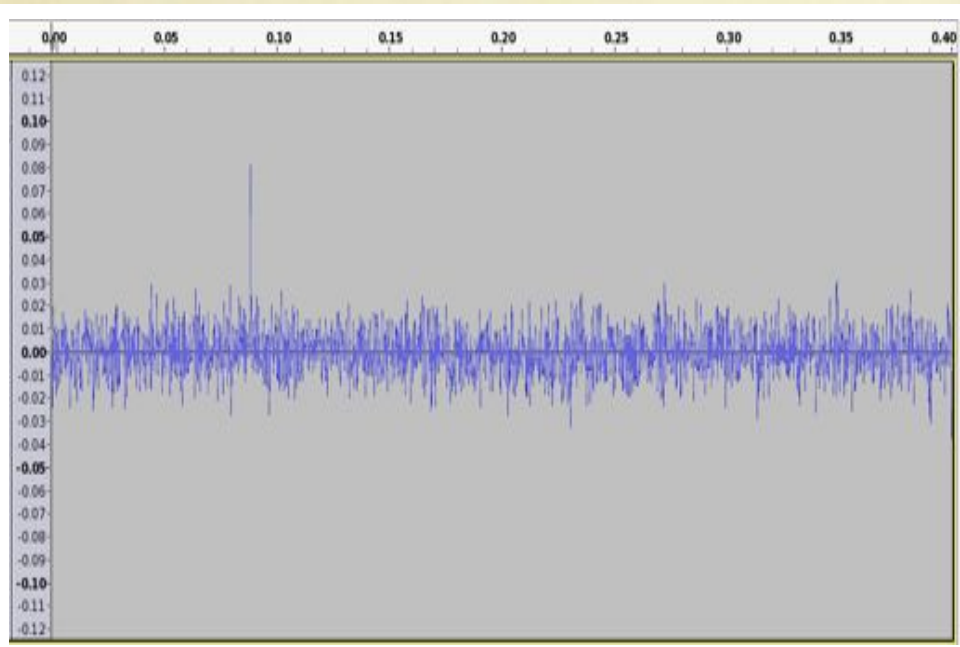


結果

～8ヶ月分のデータに対して、
SDとの時間差 $< 100\mu\text{s}$
SDで再構成されたエネルギー $> 1\text{EeV}$
となる事象を探索

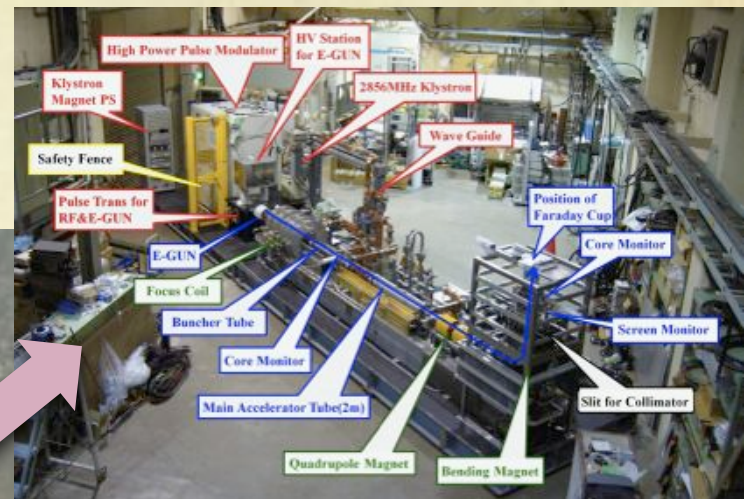
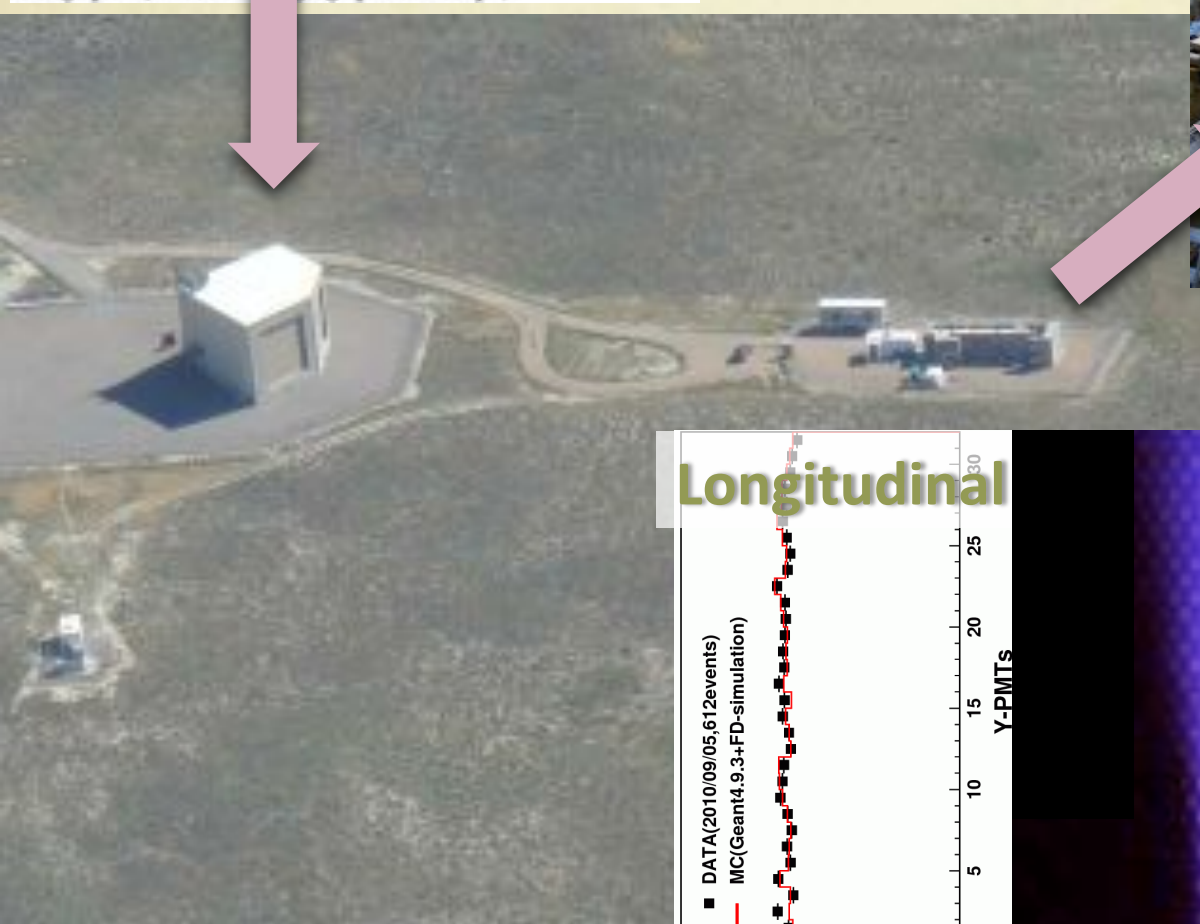
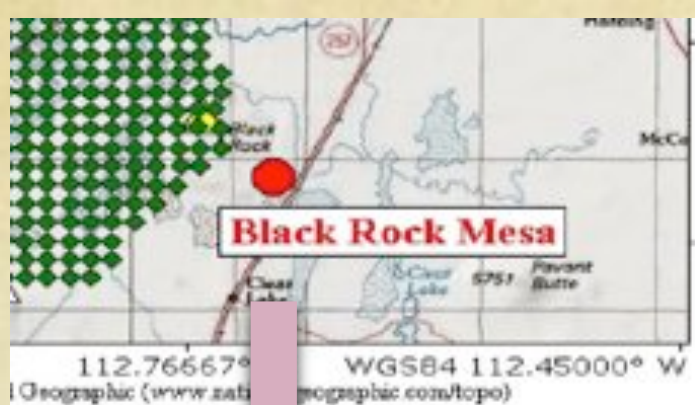


バックグラウンドに対して有意な信号無し



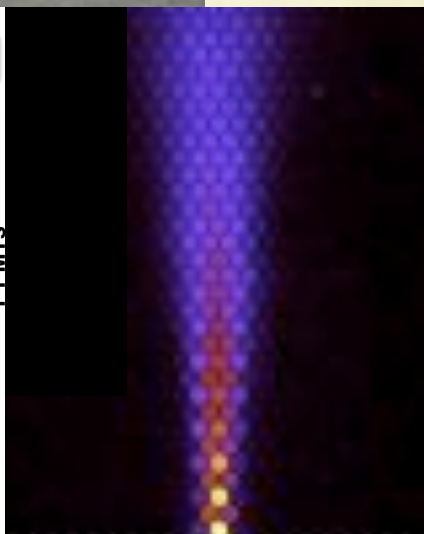
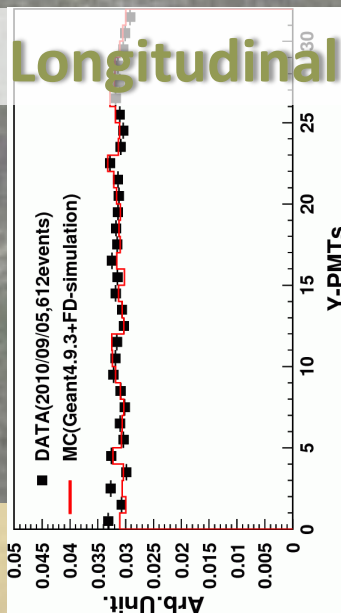
同様にFDトリガー事象に対してもサーチしてみたが、有意な信号無し

ELS(Electron Light Source)

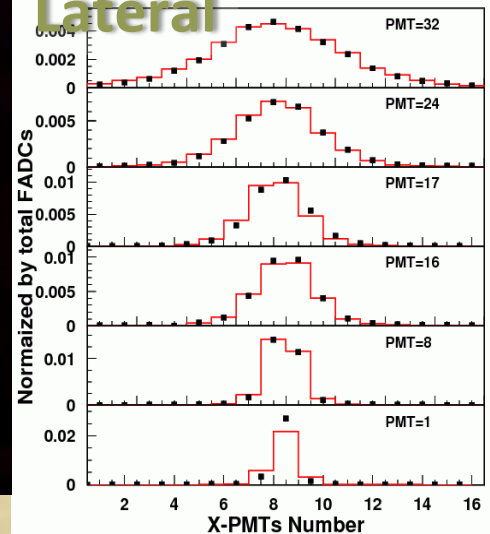


Shot: Sep. 5, 2010, 4:30UTC
Energy: 41.1 MeV

Longitudinal



Lateral



ELSによる校正

観測手法の確立

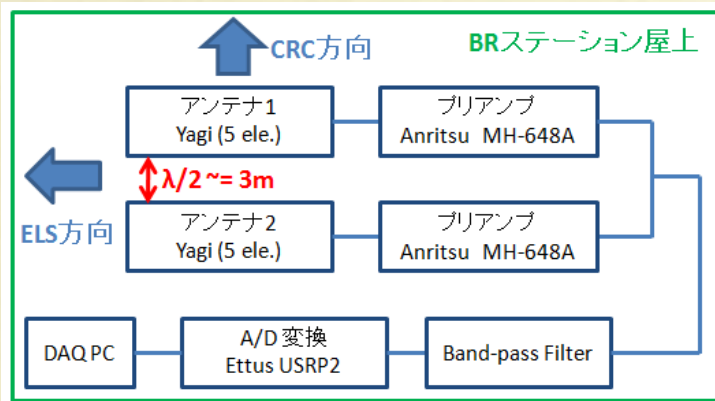
散乱断面積の測定

BRステーション屋上にアンテナを設置

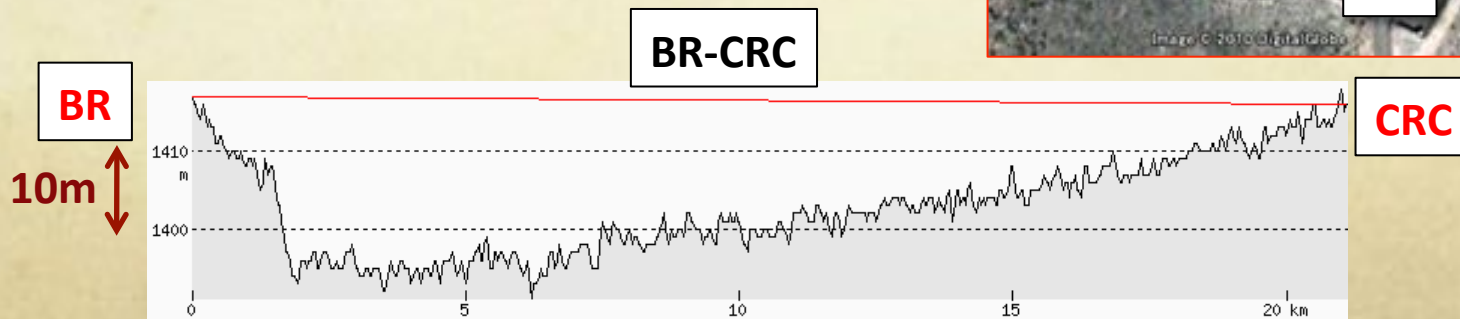
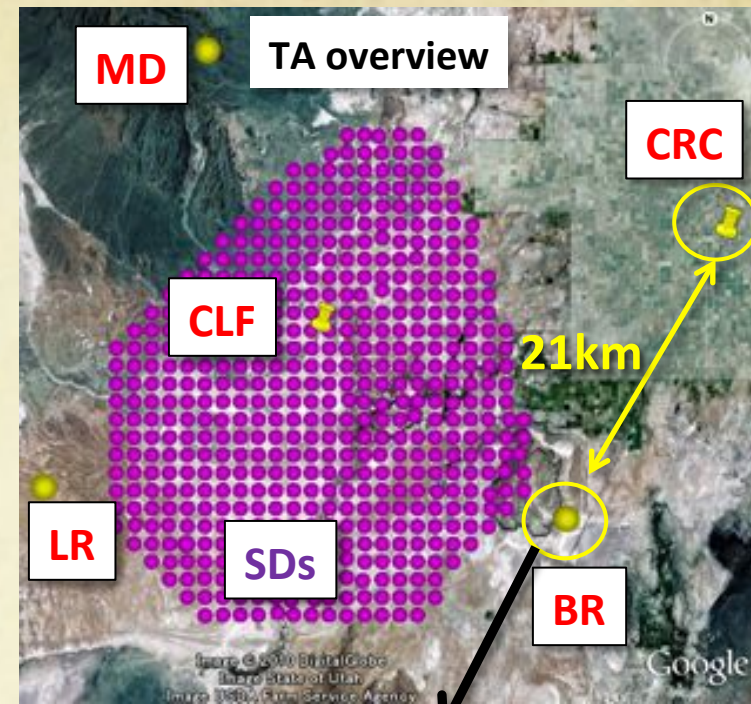
Radio path: CRC - ELS - BR

CRC-BR間とELS-BR間の角度が90度であることを利用して、送信波の直接受信量を減少させる。

•Expected S/N: $\sim 30 / 1000\text{shots}$ (30min)



来週からユタでアンテナ設置、予備試験開始



TARA 今後の予定

送信側:

送信出力を2kWから**40kW**に増やす

アンテナゲインの調整

アンテナカバー角度を減らす

-> ~100倍程度出力向上

(ただしカバーする領域は減る)

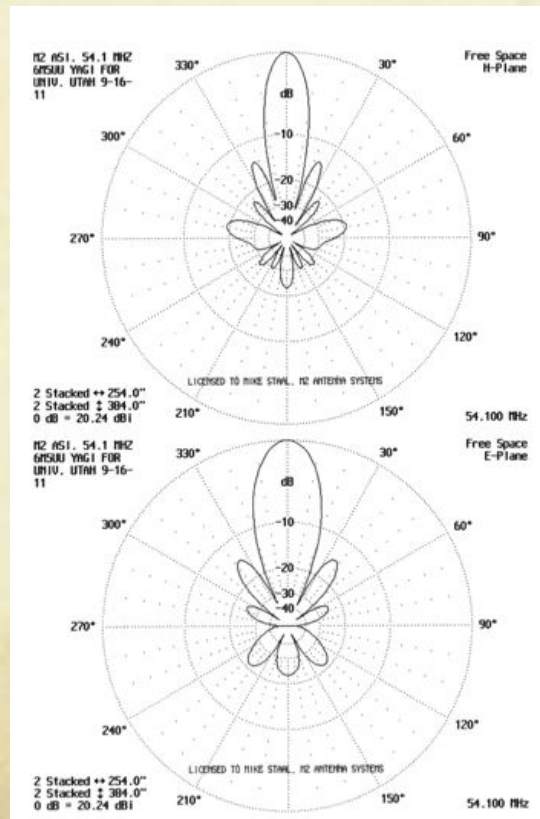
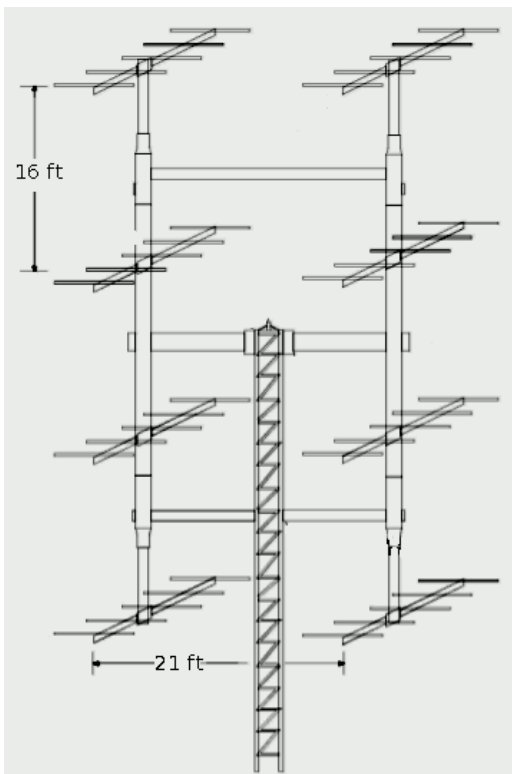
受信側:

サンプリングレートを**250MHz**まで上昇

→チャープ信号に対応

”スマート”セルフトリガーの実装

→**オンラインパターンマッチング**



NI PXIe / FlexRIO

- 250 MHz ADC
- complete control of FPGA
- large FPGA
- 256 MB DRAM (data buffering)
- computer and FPGA in same chassis
- 400 MHz clock

まとめ

- UHECRの将来計画として、大規模検出器が必要
- 電波観測はブレークスルーとなる可能性があり、注目されている
 - 安価、100% duty
- 電波観測には主に3種類のプロセスがあり、各実験それぞれ成果が出始めた。
- TARA実験は電波エコーを用いたシャワー検出に挑戦中。
- 来年度、ELSによる較正試験開始