



最高エネルギー宇宙線の 電波的観測の研究

Contents

- 電波エコー法
- TA実験との空気シャワー同時観測
- 加速器からの電子ビームを用いた試験

池田大輔
東京大学宇宙線研究所

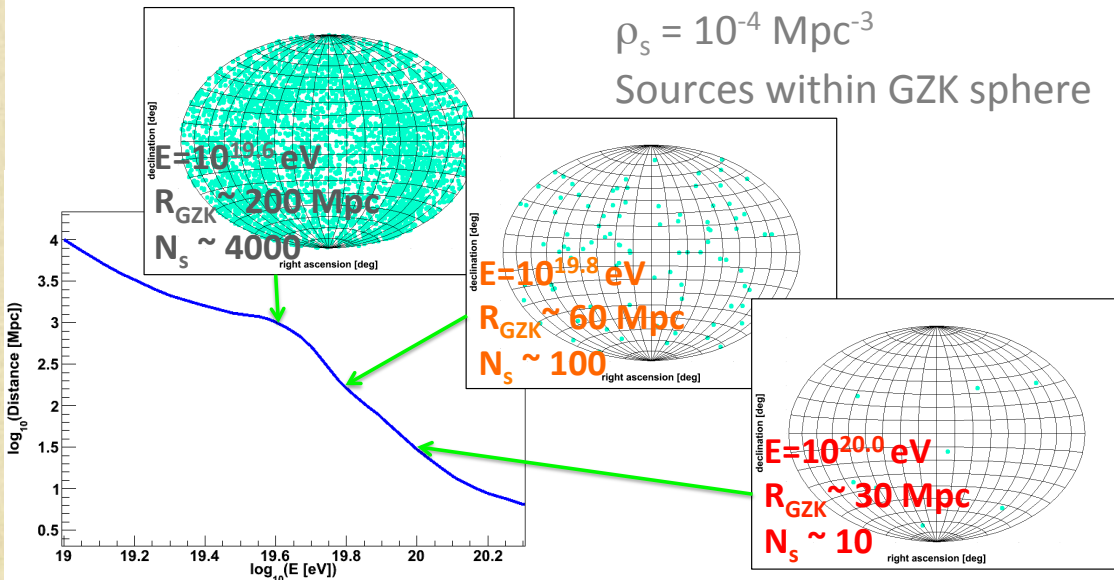
UHECR観測の将来計画

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

$$\rho_s = 10^{-4} \text{ Mpc}^{-3}$$

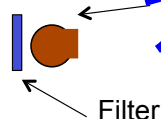
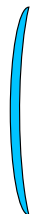
Sources within GZK sphere



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 $\sim 10\%$

Fresnel lens
 $30^\circ \times 30^\circ \text{ fov}$
 1 m^2



$8''\text{--}10'' \text{ FWHM}$
 electronics

大規模FDアレイ？

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

大規模SDアレイ？

10,000 SDs

Spacing = 2.0km

→ **39,200 km²**

TA-SD

TA-2

TA x 57.8

Auger x 13.1

電波による宇宙線観測

電波による観測手法

電波を用いた観測 (期待)

- 24時間観測
- 天候によらない
- 安価
- 少数検出器
- 縦発達の観測？

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

Askaryan effect

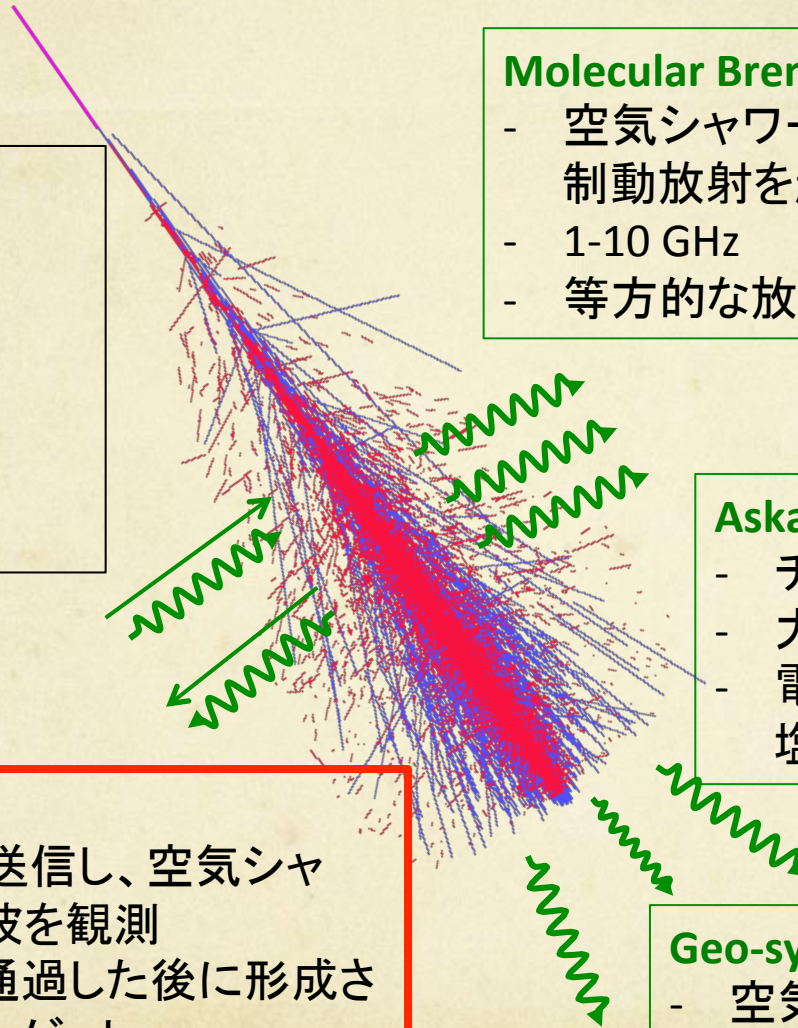
- チェレンコフ効果
- 大気中ではその他の電波が優勢
- 電波に対して透明な媒質(氷、岩塩、月面)が対象

Radar echo

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

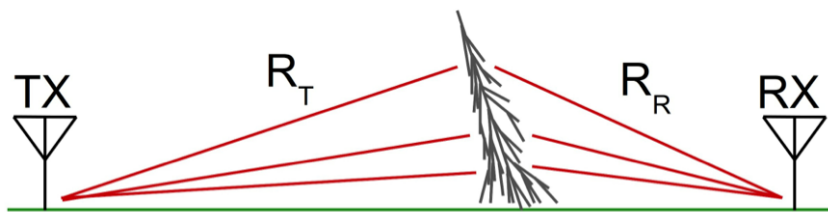
Geo-synchrotron radiation

- 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



レーダーによる宇宙線観測

多地点同時流星観測プロジェクト

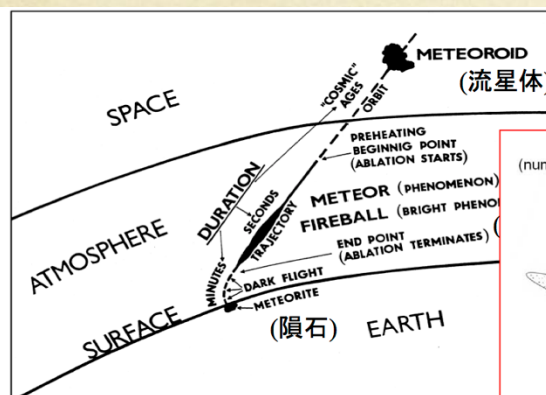


•50MHz帯の電波を送信し、空気シャワー通過時に電離損失で発生する電子により散乱された電波を観測する

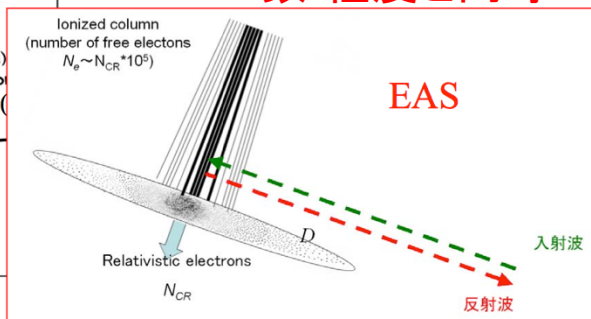
$$P_R = P_T \cdot \left(\frac{G_T}{4\pi R_T^2} \right) \cdot \sigma \cdot \left(\frac{G_R}{4\pi R_R^2} \right) \cdot \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right)$$

流星観測において実績有

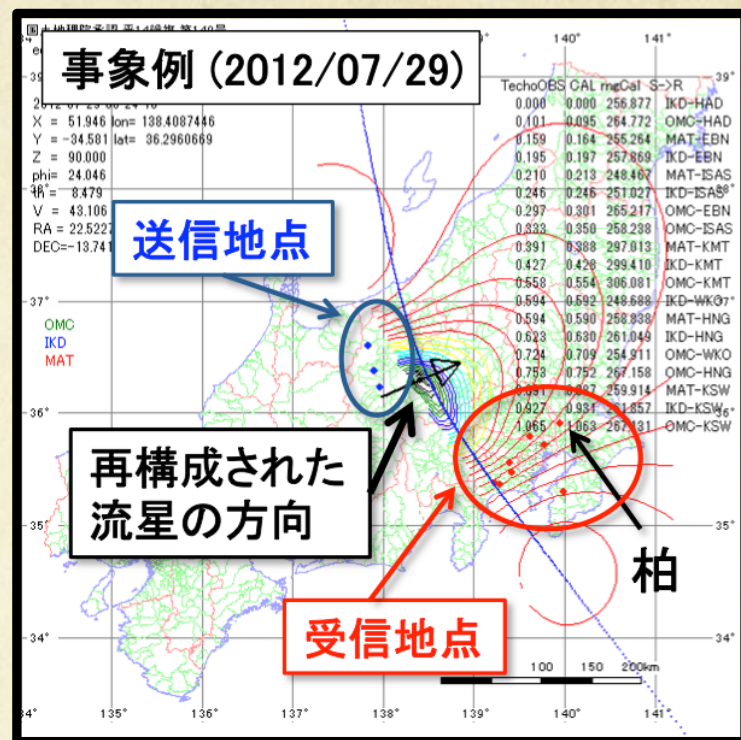
流星: 高度~100km, ~70km/s, ~数 μ gの塵



エネルギーは両者
~数J程度と同等



EAS: 高度~数km, 光速, 原子核(p~Fe)



再構成された方向と放射点(2009)

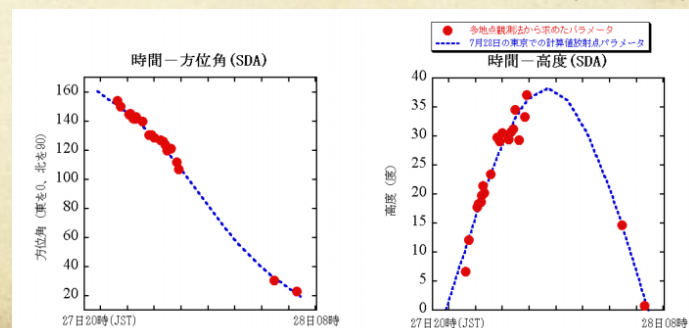


図1 観測時間と方位角の関係

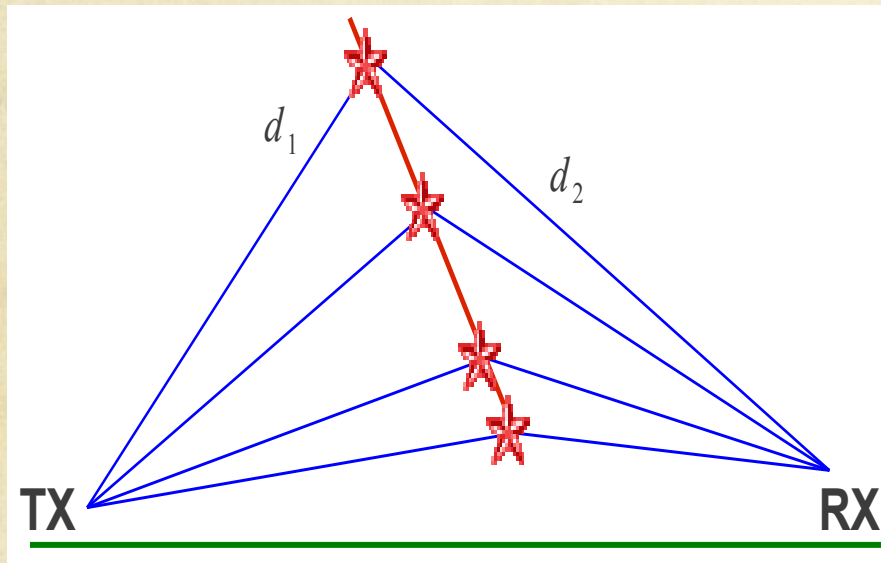
図2 観測時間と高度の関係

期待される信号

流星事象との違い

- 高度 流星: $\sim 100\text{km}$, 宇宙線: $\sim 10\text{km}$ → 電子の寿命が短い
- 反射体の移動速度 流星: $\sim 70\text{km/s}$, 宇宙線: 光速 → Chirp

“Chirp”信号



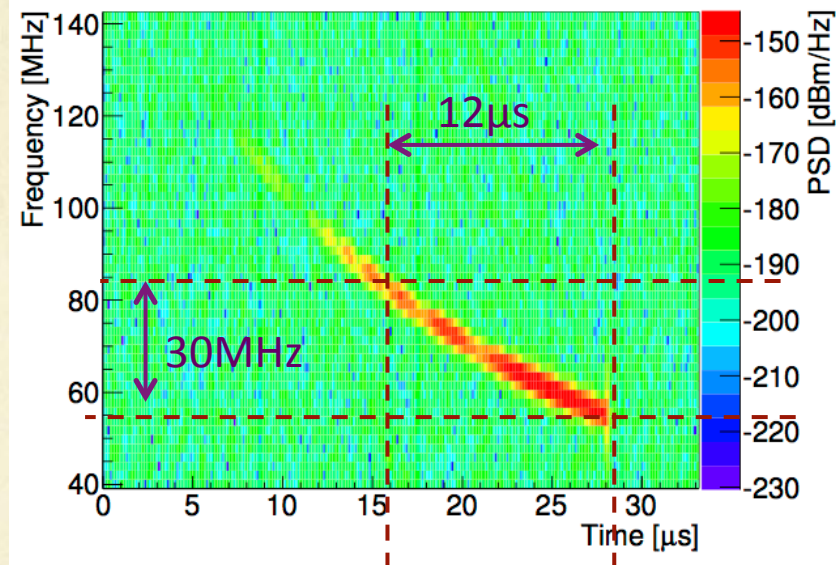
散乱点が光速で移動→ドップラー効果
(電子寿命は $\sim 100\text{ns}$ @ 10km 程度)

時間情報から縦発達情報を得る可能性？

シャワー横方向広がりによる影響

電子分布が波長より大きい場合には、
反射波のコヒーレンスが崩れる→信号強度の減少
地面に近い部分では影響が大きくなる

期待される信号の例 (54.1MHz送信、 10^{19}eV)



空気シャワー特有

→信号同定やセルフトリガーの可能性？

Chirpは典型的には $\sim \text{MHz}/\mu\text{s}$ 程度

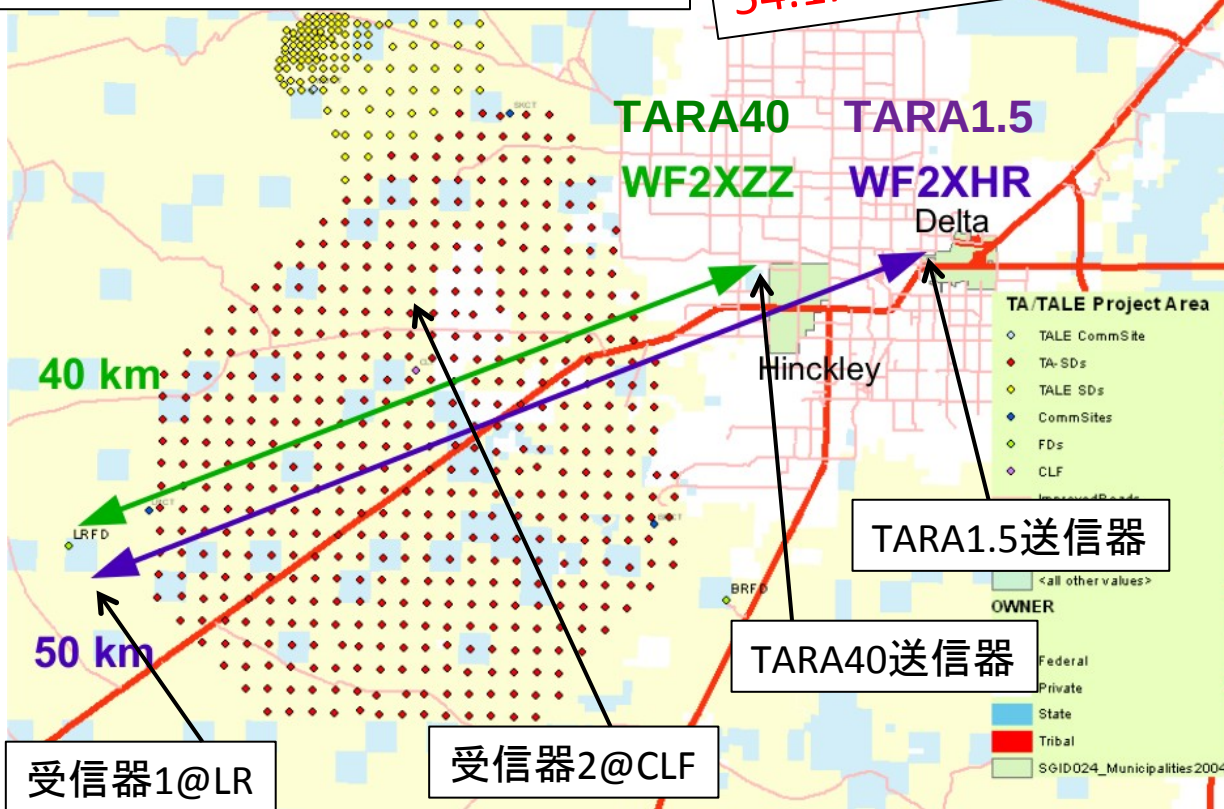
受信装置には
広い受信帯域が必要

TARA: Telescope Array RAdar

TA実験との同時観測により、レーダーを用いた宇宙線観測法を確立する
 TA実験の地表検出器/大気蛍光望遠鏡により
 空気シャワー事象と同定された事象を、電波で同時に観測する

米国ユタ州TA実験実験サイト

54.1MHz Bistatic Radar



砂漠なので、まずはインフラ（電力！）が整っている場所に送信器/受信器を設置

TARA1.5 (2011-2012)

- 最大1.5kW CW 送信器
- 50km離れた大気蛍光望遠鏡サイトに受信器

TARA40 (2013-)

- 最大40kW CW送信器
- 元の受信器の帯域幅の向上
- サイト中央の大気測定レーザー射出サイトに受信器を追加

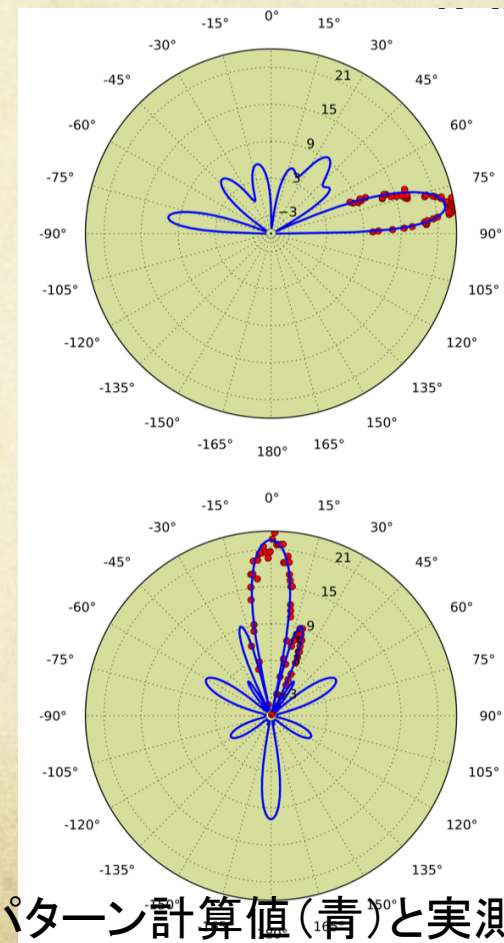
TARA送信器

- 八木アンテナ x 8
- ビーム幅 **+14度**
- アンテナゲイン **22dBi**
- 送信出力 **最大 40kW, CW**
- 送信周波数 **54.1MHz**
 - 米国旧アナログTV ch2

TARA (TA Radar) の送信機：宇宙線からの電波エコーを捉えるR&D

TELESCOPE ARRAY

- 2013年から水平偏波、
20kW出力で運転開始
- 2014年8月に30kW出力にupgrade
- 2014年10月から垂直偏波に変更作業開始



ビームパターン計算値(青)と実測値(赤)

受信器1@LR

大気蛍光望遠鏡サイトの一つである、Long Ridge サイトに設置

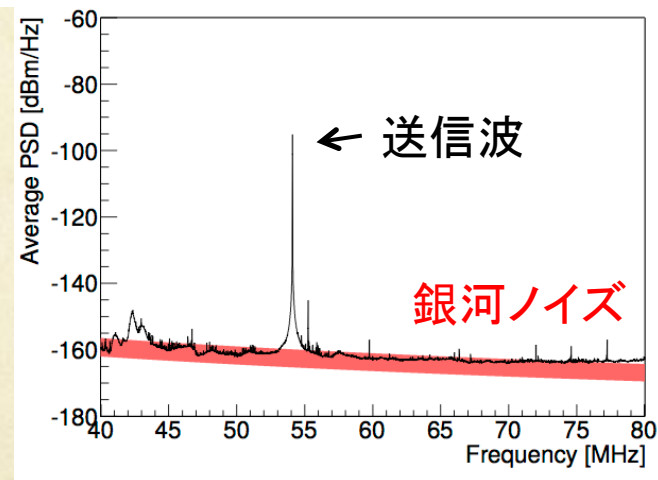
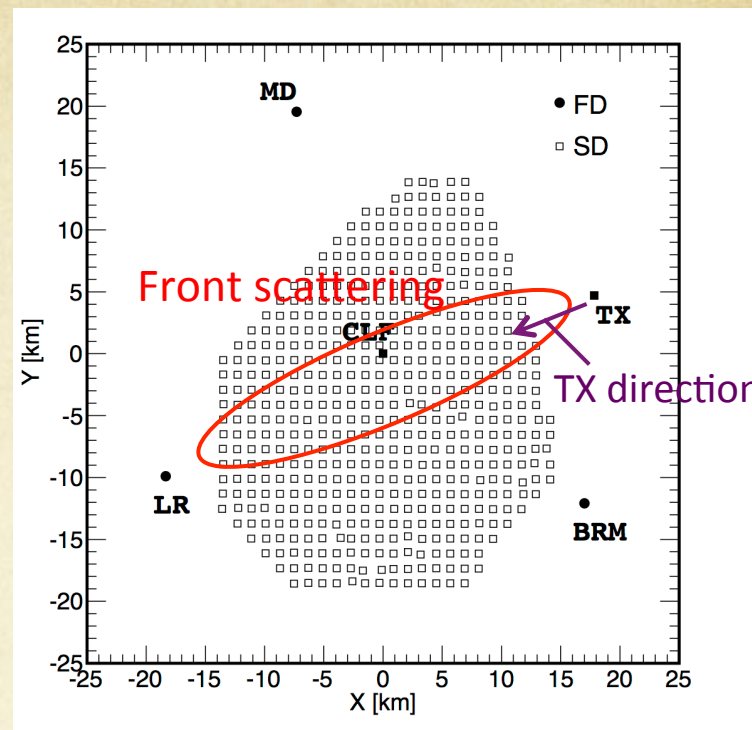
- Dual polarized log periodic antenna x 4
- 250MHz sampling ADC (TARA1.5は12.5Msps)
- 40-80MHz range
- 大気蛍光望遠鏡からのトリガー & セルフトリガー

装置Upgrade & 校正完了

- SGにて擬似chirp信号を入れる
- アンテナパターン測定
- ノイズ測定



受信器@LR

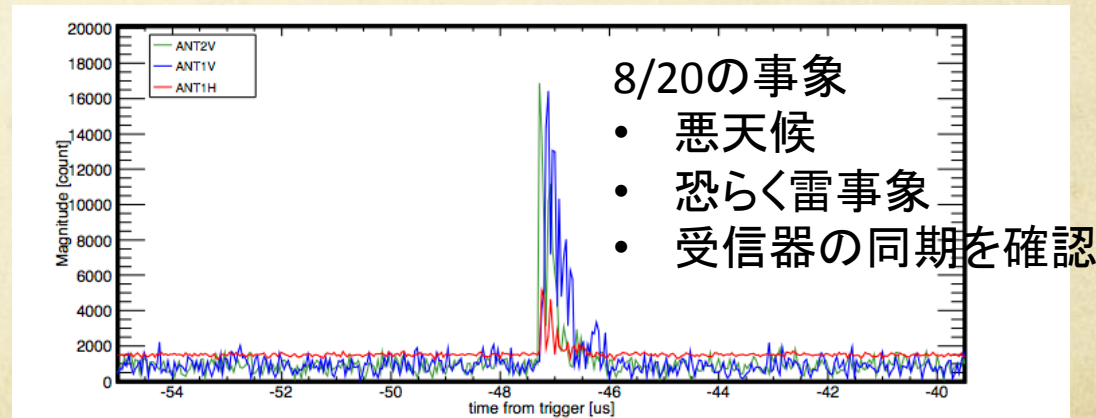
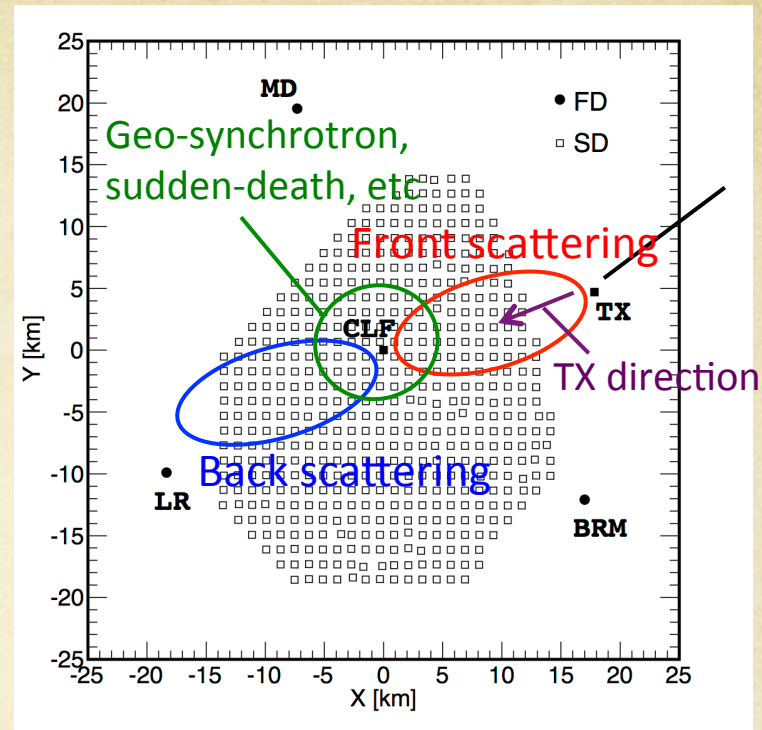


- 2013年8月-2014年4月までの観測において、有意な信号は見られなかった
 - 散乱断面積のupper limitの計算中
- 今後、30kW送信のデータ、及び垂直偏波による観測を行なう

受信器2@CLF

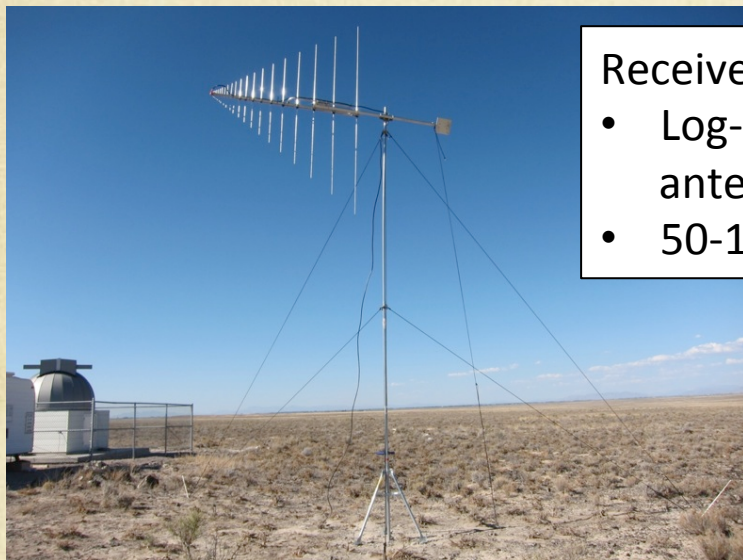
レーザー射出サイトであるCLFに設置

- Dual polarized log periodic antenna x 2
- デジタル受信器(USRP+WBX)による直交検波
 - 中心周波数54.1MHz, Sampling 25MHz
 - GPS 1PPS+10MHz clockにより
絶対時間精度50nsで全受信器を同期
 - 50-66MHz range
- 地表検出器からのトリガーでデータを取得
- エコー信号以外の宇宙線由来の電波もターゲット
- 2014年7月に設置、10月に壊れたAmp/USRPを修復



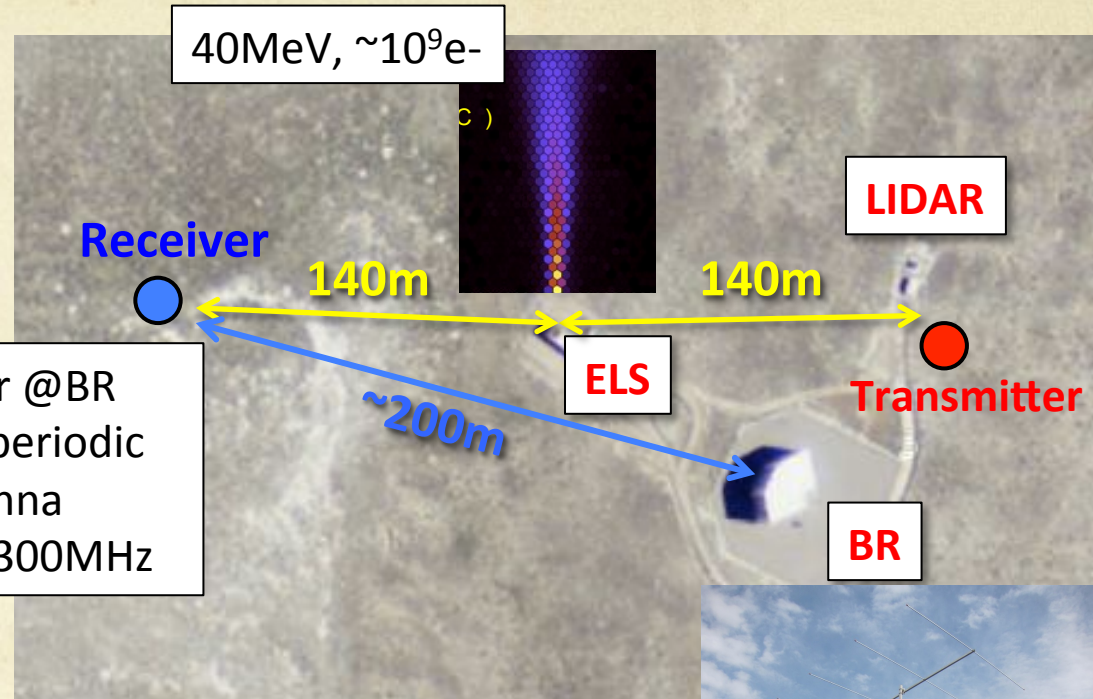
電子線形加速器からのビームを用いた実証実験

TA実験の小型電子線形加速器
(Electron Light Source: ELS)か
らの電子ビームをターゲットとし
た電波エコ手法検証実験を
行なう



Receiver @BR

- Log-periodic antenna
- 50-1300MHz



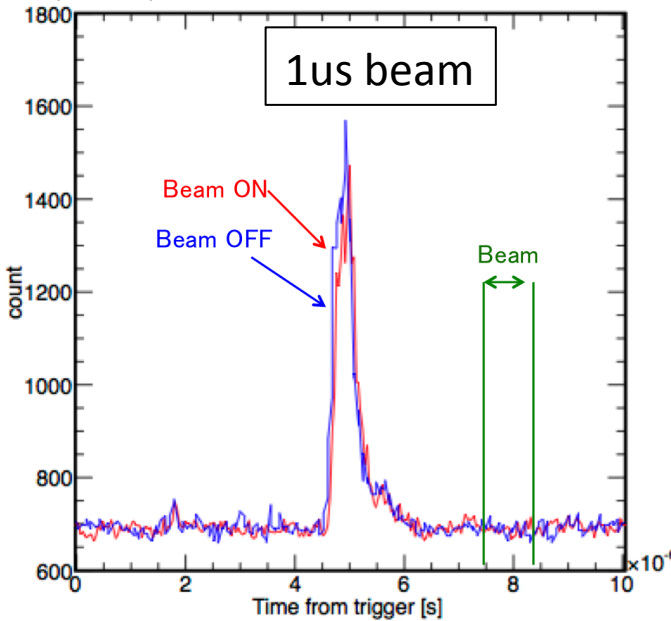
Transmitter @BR

- 八木アンテナ
- 60MHz, ~10W

- DAQはCLFの受信器と同じ物を使用
- ELSビームは2種類の時間幅のビームを用意
 - **1us beam**: FD較正で使用する物
 - **20ns beam**: 1us beamと同じ電荷量で時間幅を短くした物
- 電波のON/OFF、ビームのON/OFFの条件でデータを比較

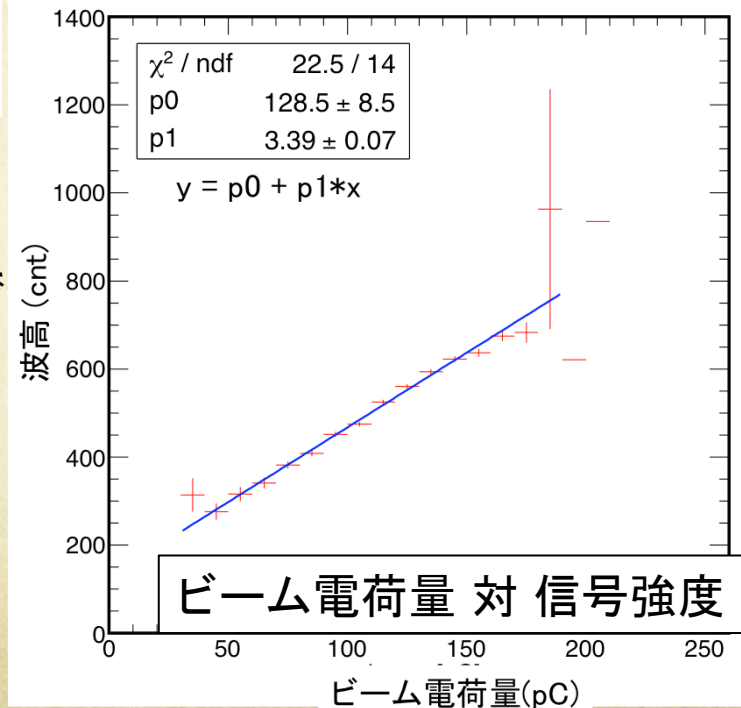
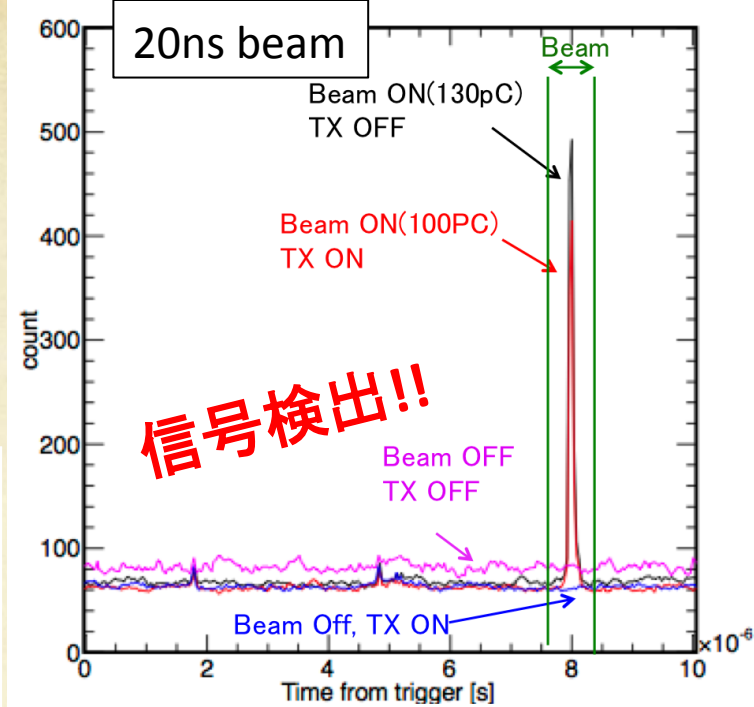
測定結果

それぞれ~600 eventsの平均



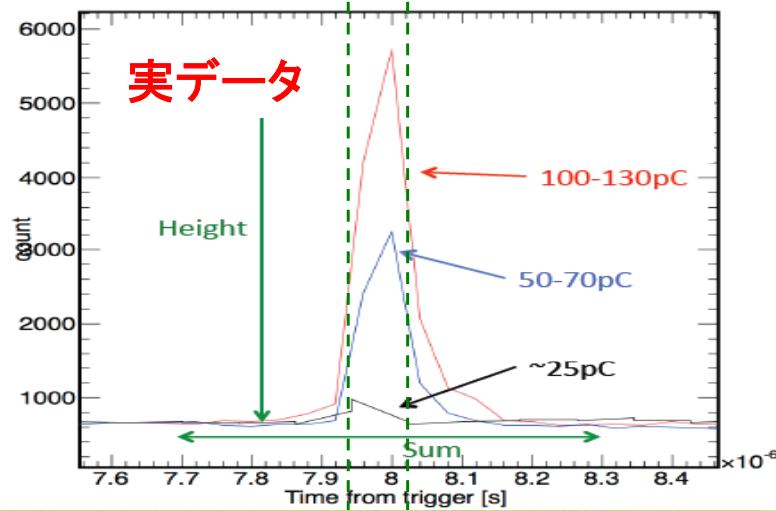
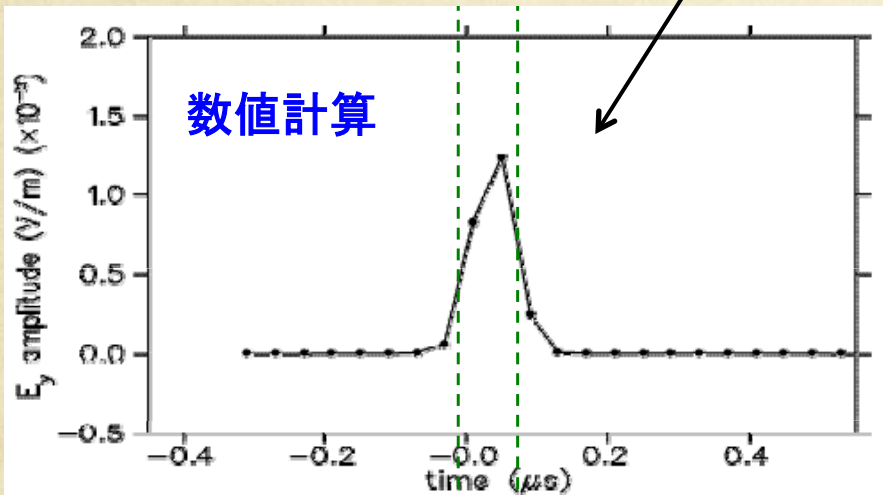
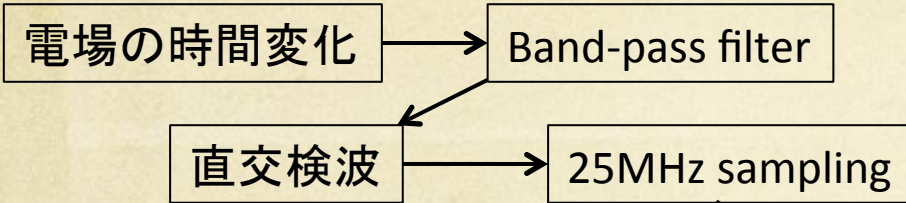
周波数	信号強度
60MHz	1
75MHz	0.94
175MHz	0.02
250MHz	0.01

- 1us beamによる試験では信号が見えなかったが、**20ns beamを用いた試験では信号が検出された**
- ただし送信電波をOFFにしても信号が検出されるので**電波エコーではない**
- 信号強度はビーム電荷に比例している**ので、ビーム由来の電波
- 周波数を上げると信号強度は小さくなる
- 偏波を変えた測定では、垂直偏波は水平偏波の2倍の強度があった



信号の起源と宇宙線への応用

ビーム内電子が作る静電場の時間変化？



33RD INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE, RIO DE JANEIRO 2013
THE ASTROPARTICLE PHYSICS CONFERENCE

ICRC
2013

Coherent radio emission from the cosmic ray air shower **sudden death**

BENOÎT REVENU AND VINCENT MARIN

SUBATECH, 4 rue Alfred Kastler, BP20722, 44307 Nantes, CEDEX 03, Université de Nantes, École des Mines de Nantes, CNRS/IN2P3, France

- 空気シャワーの場合、電子/陽電子の両方が存在するが、陽電子の方が少ないため総電荷はマイナス
- 空気シャワーが地面に到達した際、急激な電場の変化が起こる事から電波が発生する (**Sudden death**)

本測定で観測したのは、電子ビームがコンテナから現れる際の急激な電場変化による電波 → **Sudden birth** ?

CLFに設置したアンテナで、実際に空気シャワーからのSudden death信号が受かるかどうか検証中

まとめ

- 次世代大規模超高エネルギー宇宙線実験の観測手法として、電波、特に電波エコーを使った観測に取り組んでいる
- 現在、TA実験との同時観測、及びTAの電子加速器を用いたビーム試験により、手法の検証を行なっている
- TA実験との同時観測で、約半年分のデータを解析した所、エコー事象は見つからなかった
 - 現在、散乱断面積のupper limitを計算中
 - CLFにも検出器を置き、データを取得中
 - 今後、30kW出力データの解析、及び垂直偏波による観測を行なう
- 加速器を用いた試験では、エコーではないビーム由来の電波を観測した
 - Sudden Birth信号？
 - 空気シャワー観測への応用の可能性
- この信号の中に電波エコー成分が含まれている可能性があるので、電波強度を上げた再試験を今月頭に行なった
 - データ解析中