

# 宇宙線空気シャワー・レーダー観測のR/D

寺澤敏夫 (東大宇宙線研)

$10^{20}$ eVに達する超高エネルギー宇宙線(UHECR)の起源は現在の宇宙線物理学の最大の謎である。次世代のUHECR観測法として電波的手段が注目されており、UHECRの作る巨大空気シャワーのレーダー検出法はその1つである。セミナーではレーダー法についてのR/Dの結果をお話したい。

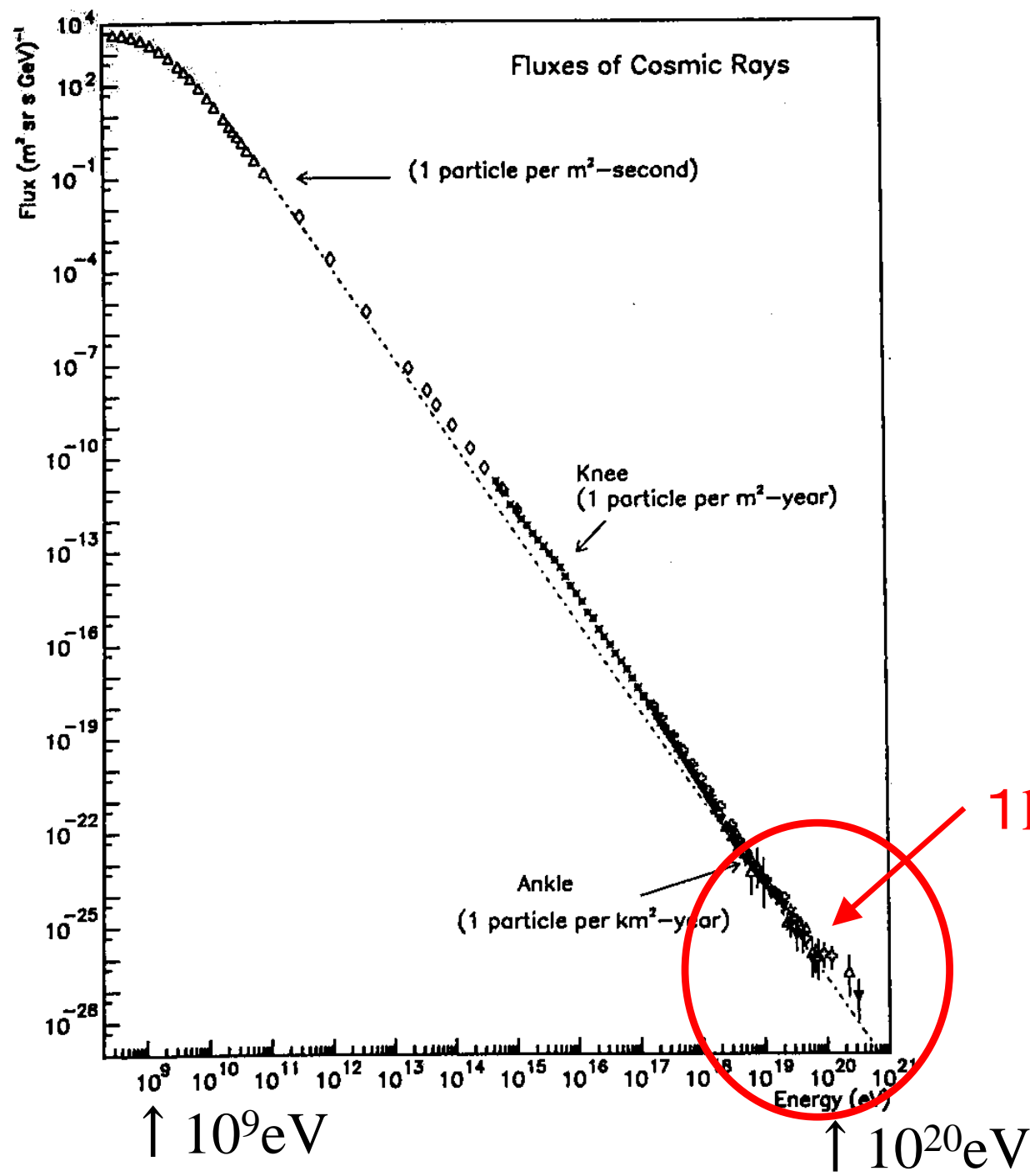
# 宇宙線空気シャワー・レーダー観測のR/D

寺澤敏夫 (東大宇宙線研)

$10^{20}$ eVに達する超高エネルギー宇宙線(UHECR)の起源は現在の宇宙線物理学の最大の謎である。次世代のUHECR観測法として電波的手段が注目されており、UHECRの作る巨大空気シャワーのレーダー検出法はその1つである。セミナーではレーダー法についてのR/Dの結果をお話したい。

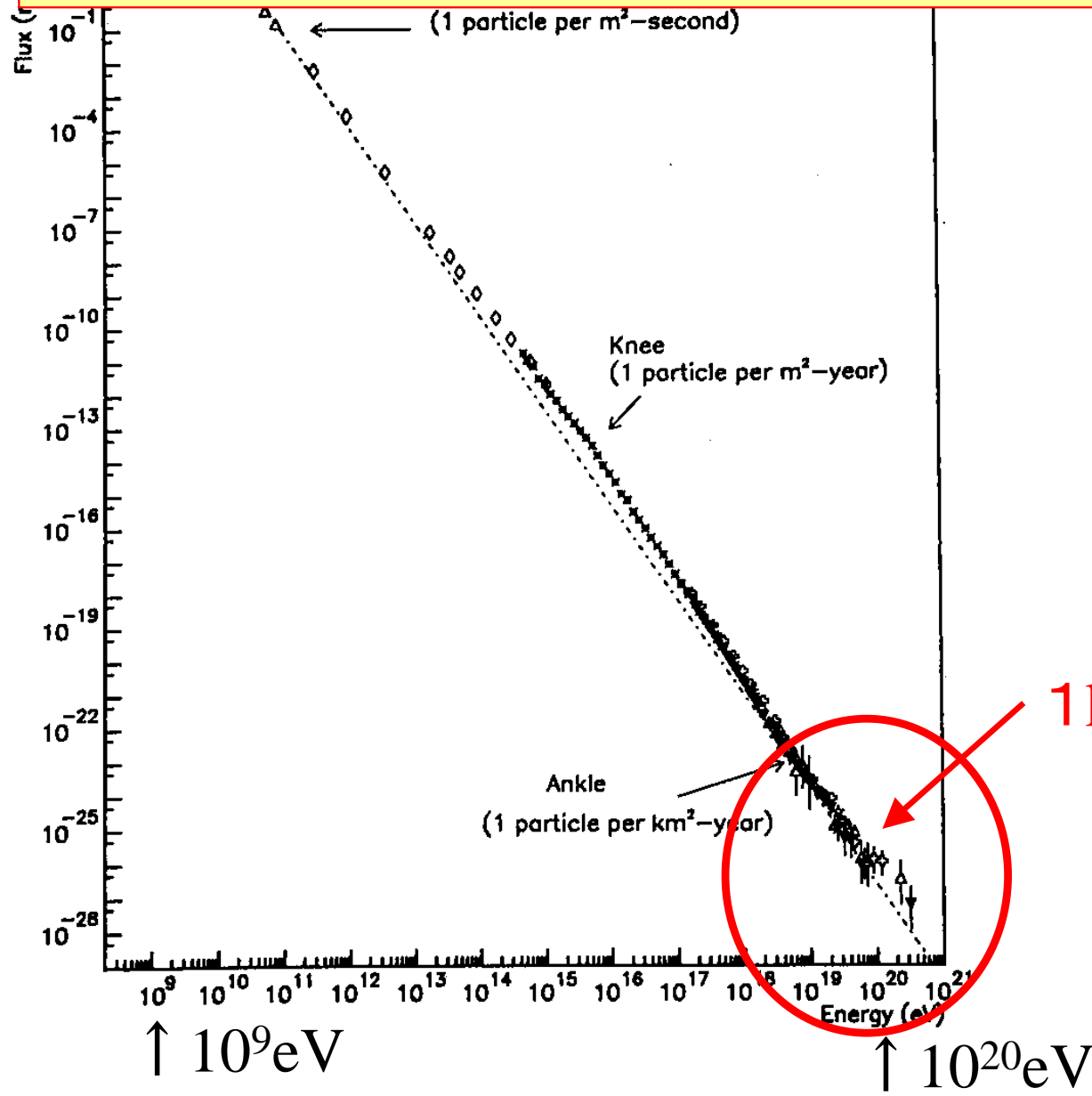
共同研究者: 中村卓司氏(極地研)・佐川宏行氏(宇宙線研)ほか

# 宇宙線のエネルギースペクトル(12桁以上に及ぶ)



1  $\text{km}^2$ ・一世紀あたり1個

現在、北天対象のTA(テレスコープアレー計画:日本+ユタ大)と南天対象のPAO(Pierre Auger Observatory:ヨーロッパ勢+シカゴ大)が相補的な観測を行いつつ、競争中である。

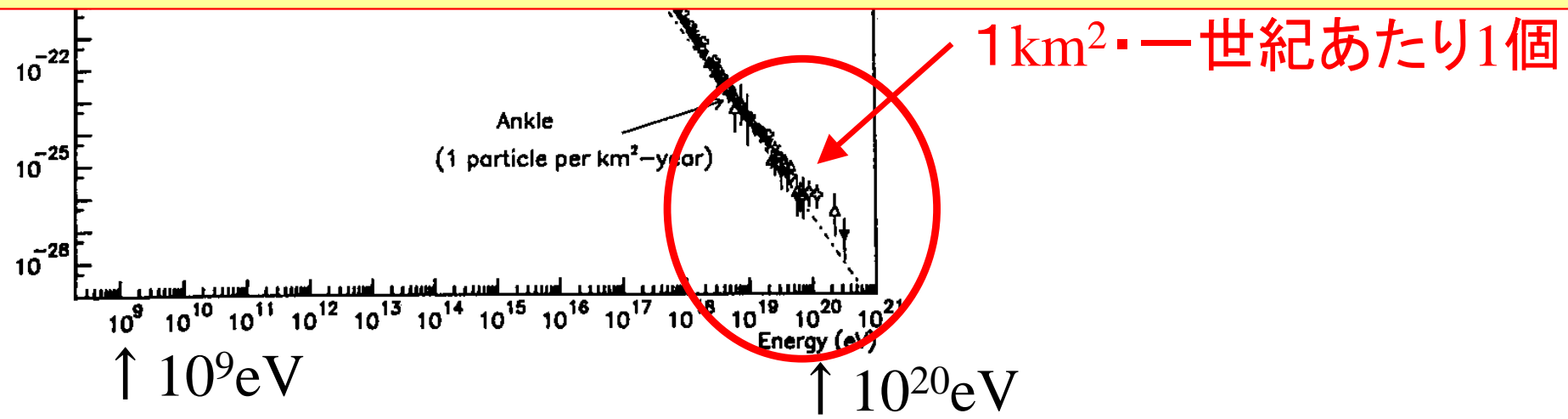


現在、北天対象のTA(テレスコープアレー計画:日本+ユタ大)と南天対象のPAO(Pierre Auger Observatory:ヨーロッパ勢+シカゴ大)が相補的な観測を行いつつ、競争中である。

UHECRの取得期待値はTAでは年間約10個、Augerでは約50個であり、まだ十分とは言えない。そのため、次世代の観測計画についての準備・議論が進んでいる。

宇宙から地上を見下ろしてEASの発光(窒素分子の蛍光)を捉え、TA、Augerの2桁上の有効面積を狙おうとするのがEUSO計画(理研・甲南大など)である。

一方、より低予算で大面積をカバーしうるものとして、地上から電波的にUHECRを測ろうとするいくつかのアイデアがある。



# 目次

1. Introduction

2. 宇宙線のさまざまな電波観測手段

3. レーダー法の原理

4. 京大信楽MUレーダー概要

5. 宇宙線エコー候補

その同定と強度推定

6. レーダー法と制動輻射受信法

付録: レーダー法学生実習

(駒場 全学体験セミナー)

## 宇宙線の電波的観測

### • 空気シャワーそのものが発生する電波

Askaryan effect (氷、岩塩などの媒質中でのチェレンコフ効果)

- Askaryan effect が測定された(D. Saltzberg et al PRL 86 (2001) 2802)
- 大気中ではその他の電波が優勢
- 入射一次宇宙線エネルギーの2乗に比例した電波強度をもち  
一次宇宙線が高エネルギーになるほど有望になる
- 電波に対して透明な物質(氷、岩塩、月面)がターゲットとなる
- FORTE, RICE, SALSA, GLUE, .....

### • 空気シャワー粒子が地磁気に巻きついてシンクロトン放射 (巻きつくといっても1/4周程度)

Geo-synchotron radiation

- 大気中では Askaryan effect よりも優勢
- 近年シミュレーターが整備されてきた
- LOFAR (プロトタイプ LOPES 1-32MHz, 4MHz 毎)

### • 空気シャワー粒子の制動放射によって生じる電波

Microwave Molecular Bremsstrahlung Radiation (MBR)

### • RADAR による宇宙線観測

## 宇宙線の電波的観測

### • 空気シャワーそのものが発生する電波

Askaryan effect (氷、岩塩などの媒質中でのチェレンコフ効果)

- Askaryan effect が測定された(D. Saltzberg et al PRL 86 (2001) 2802)
- 大気中ではその他の電波が優勢
- 入射一次宇宙線エネルギーの2乗に比例した電波強度をもち  
一次宇宙線が高エネルギーになるほど有望になる
- 電波に対して透明な物質(氷、岩塩、月面)がターゲットとなる
- FORTE, RICE, SALSA, GLUE, .....

### • 空気シャワー粒子が地磁気に巻きついてシンクロトン放射 (巻きつくといっても1/4周程度)

Geo-synchotron radiation

- 大気中では Askaryan effect よりも優勢
- 近年シミュレーターが整備されてきた
- LOFAR (プロトタイプ LOPES 1-32MHz, 4MHz 毎)

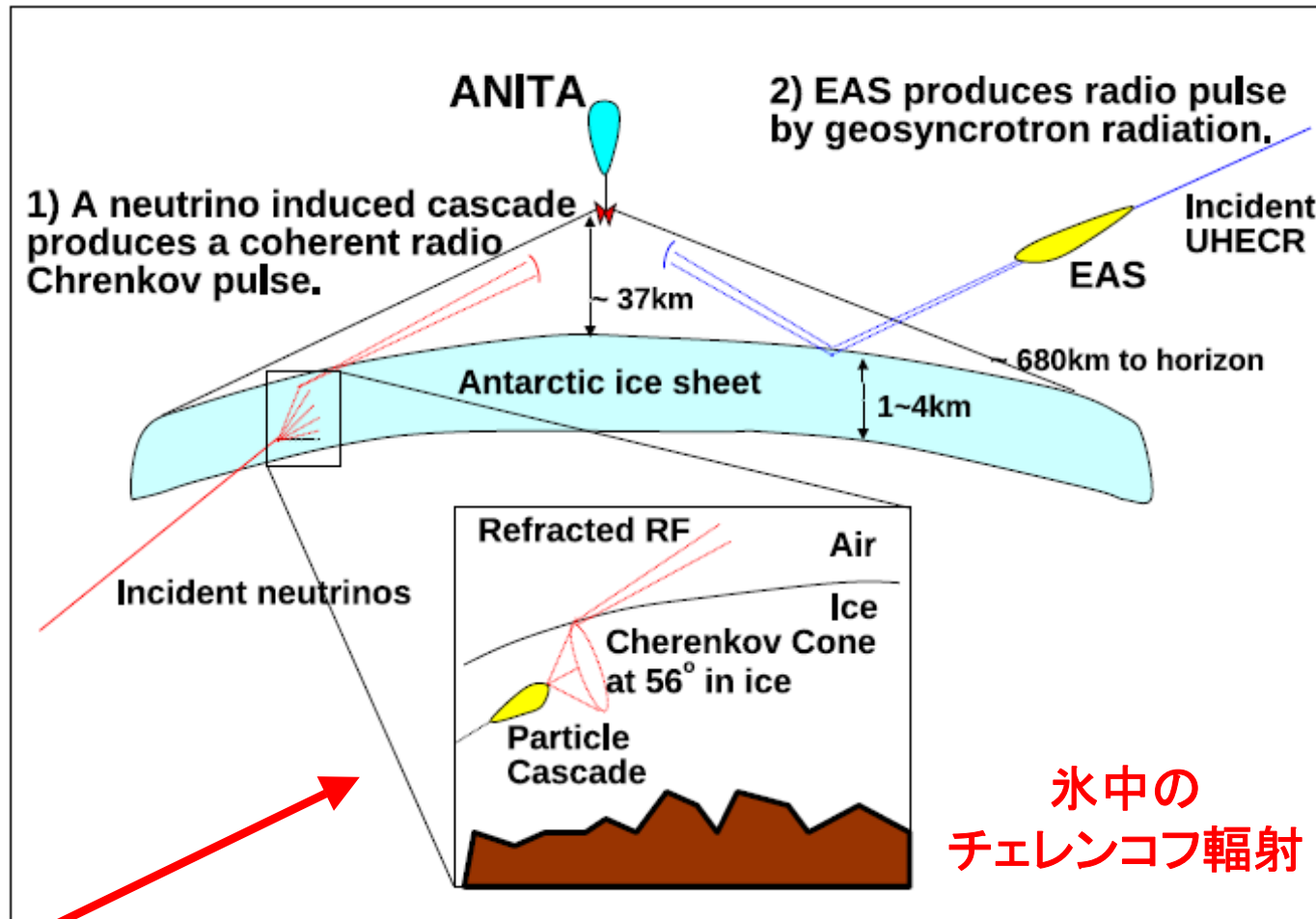
### • 空気シャワー粒子の制動放射によって生じる電波

Microwave Molecular Bremsstrahlung Radiation (MBR)

### • RADAR による宇宙線観測



# Possible Impulsive Radio Signals from Ultra-high Energy Extensive Air Showers Detected by the ANITA Experiment



ニュートリノ起源カスケード

## 宇宙線の電波的観測

### • 空気シャワーそのものが発生する電波

Askaryan effect (氷、岩塩などの媒質中でのチェレンコフ効果)

- Askaryan effect が測定された(D. Saltzberg et al PRL 86 (2001) 2802)
- 大気中ではその他の電波が優勢
- 入射一次宇宙線エネルギーの2乗に比例した電波強度をもち  
一次宇宙線が高エネルギーになるほど有望になる
- 電波に対して透明な物質(氷、岩塩、月面)がターゲットとなる
- FORTE, RICE, SALSA, GLUE, .....

### • 空気シャワー粒子が地磁気に巻きついてシンクロトン放射 (巻きつくといっても1/4周程度)

Geo-synchotron radiation

- 大気中では Askaryan effect よりも優勢
- 近年シミュレーターが整備されてきた
- LOFAR (プロトタイプ LOPES 1-32MHz, 4MHz 毎)

### • 空気シャワー粒子の制動放射によって生じる電波

Microwave Molecular Bremsstrahlung Radiation (MBR)

### • RADAR による宇宙線観測

## 宇宙線の電波的観測

### • 空気シャワーそのものが発生する電波

Askaryan effect (氷、岩塩などの媒質中でのチェレンコフ効果)

- Askaryan effect が測定された(D. Saltzberg et al PRL 86 (2001) 2802)
- 大気中ではその他の電波が優勢
- 入射一次宇宙線エネルギーの2乗に比例した電波強度をもち  
一次宇宙線が高エネルギーになるほど有望になる
- 電波に対して透明な物質(氷、岩塩、月面)がターゲットとなる
- FORTE, RICE, SALSA, GLUE, .....

### • 空気シャワー粒子が地磁気に巻きついてシンクロトン放射 (巻きつくといっても1/4周程度)

Geo-synchotron radiation

- 大気中では Askaryan effect よりも優勢
- 近年シミュレーターが整備されてきた
- LOFAR (プロトタイプ LOPES 1-32MHz, 4MHz 毎)

### • 空気シャワー粒子の制動放射によって生じる電波

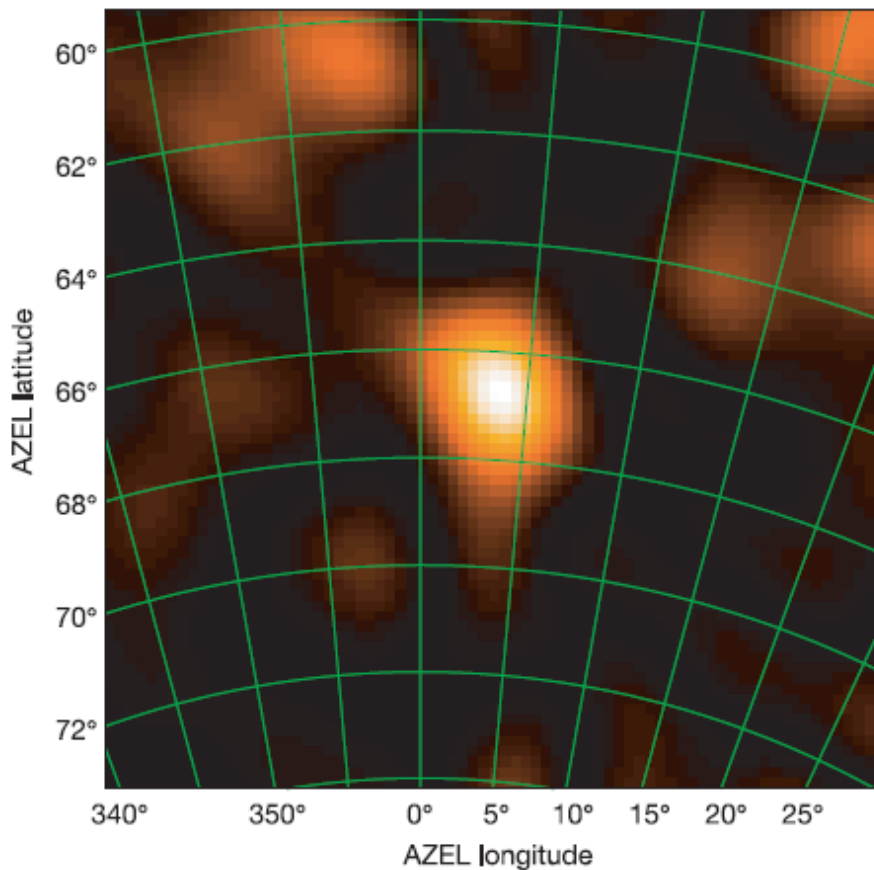
Microwave Molecular Bremsstrahlung Radiation (MBR)

### • RADAR による宇宙線観測

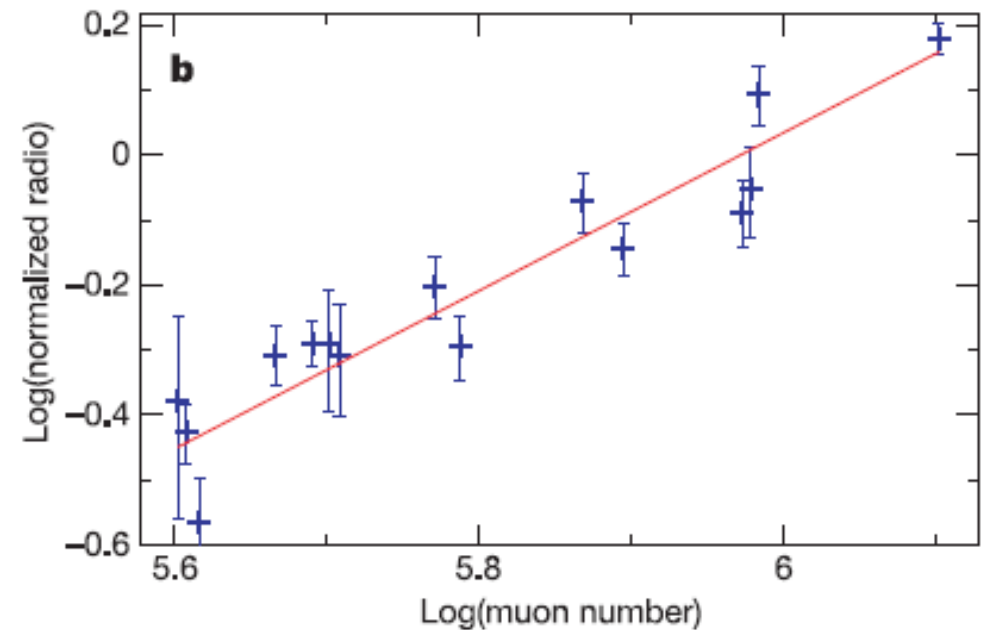
Falcke et al., Nature 435, 313-316 (2005)

# Detection and imaging of atmospheric radio flashes from cosmic ray air showers

(地磁気内でのシンクロトン輻射～数十MHz帯)



宇宙線空気シャワーの電波イメージ  
(干渉計による像合成)



電波強度 vs.  $\mu$  粒子強度  
(LOPES & KASCADE)

## 宇宙線の電波的観測

### • 空気シャワーそのものが発生する電波

Askaryan effect (氷、岩塩などの媒質中でのチェレンコフ効果)

- Askaryan effect が測定された(D. Saltzberg et al PRL 86 (2001) 2802)
- 大気中ではその他の電波が優勢
- 入射一次宇宙線エネルギーの2乗に比例した電波強度をもち一次宇宙線が高エネルギーになるほど有望になる
- 電波に対して透明な物質(氷、岩塩、月面)がターゲットとなる
- FORTE, RICE, SALSA, GLUE, .....

### • 空気シャワー粒子が地磁気に巻きついてシンクロトン放射 (巻きつくといっても1/4周程度)

Geo-synchotron radiation

- 大気中では Askaryan effect よりも優勢
- 近年シミュレーターが整備されてきた
- LOFAR (プロトタイプ LOPES 1-32MHz, 4MHz 毎)

### • 空気シャワー粒子の制動放射によって生じる電波

Microwave Molecular Bremsstrahlung Radiation (MBR)

### • RADAR による宇宙線観測

## 宇宙線の電波的観測

- 空気シャワーそのものが発生する電波

Askaryan effect (氷、岩塩などの媒質中でのチェレンコフ効果)

- Askaryan effect が測定された(D. Saltzberg et al PRL 86 (2001) 2802)
- 大気中ではその他の電波が優勢
- 入射一次宇宙線エネルギーの2乗に比例した電波強度をもち  
一次宇宙線が高エネルギーになるほど有望になる
- 電波に対して透明な物質(氷、岩塩、月面)がターゲットとなる
- FORTE, RICE, SALSA, GLUE, .....

- 空気シャワー粒子が地磁気に巻きついてシンクロトン放射  
(巻きつくといっても1/4周程度)

Geo-synchotron radiation

- 大気中では Askaryan effect よりも優勢
- 近年シミュレーターが整備されてきた
- LOFAR (プロトタイプ LOPES 1-32MHz, 4MHz 毎)

- 空気シャワー粒子の制動放射によって生じる電波

Microwave Molecular Bremsstrahlung Radiation (MBR)

- RADAR による宇宙線観測

## 宇宙線の電波的観測

### • 空気シャワーそのものが発生する電波

Askaryan effect (氷、岩塩などの媒質中でのチェレンコフ効果)

- Askaryan effect が測定された(D. Saltzberg et al PRL 86 (2001) 2802)
- 大気中ではその他の電波が優勢
- 入射一次宇宙線エネルギーの2乗に比例した電波強度をもち  
一次宇宙線が高エネルギーになるほど有望になる
- 電波に対して透明な物質(氷、岩塩、月面)がターゲットとなる
- FORTE, RICE, SALSA, GLUE, .....

### • 空気シャワー粒子が地磁気に巻きついてシンクロトン放射 (巻きつくといっても1/4周程度)

Geo-synchotron radiation

- 大気中では Askaryan effect よりも優勢
- 近年シミュレーターが整備されてきた
- LOFAR (プロトタイプ LOPES 1-32MHz, 4MHz 毎)

これについては  
後で述べる

### • 空気シャワー粒子の制動放射によって生じる電波

Microwave Molecular Bremsstrahlung Radiation (MBR)

### • RADAR による宇宙線観測



## 宇宙線の電波的観測

- 空気シャワーそのものが発生する電波

Askaryan effect (氷、岩塩などの媒質中でのチェレンコフ効果)

- Askaryan effect が測定された(D. Saltzberg et al PRL 86 (2001) 2802)
- 大気中ではその他の電波が優勢
- 入射一次宇宙線エネルギーの2乗に比例した電波強度をもち  
一次宇宙線が高エネルギーになるほど有望になる
- 電波に対して透明な物質(氷、岩塩、月面)がターゲットとなる
- FORTE, RICE, SALSA, GLUE, .....

- 空気シャワー粒子が地磁気に巻きついてシンクロトン放射  
(巻きつくといっても1/4周程度)

Geo-synchotron radiation

- 大気中では Askaryan effect よりも優勢
- 近年シミュレーターが整備されてきた
- LOFAR (プロトタイプ LOPES 1-32MHz, 4MHz 毎)

- 空気シャワー粒子の制動放射によって生じる電波

Microwave Molecular Bremsstrahlung Radiation (MBR)

- **RADAR による宇宙線観測**



# 目次

1. Introduction

2. 宇宙線のさまざまな電波観測手段

---

3. レーダー法の原理

4. 京大信楽MUレーダー概要

5. 宇宙線エコー候補

その同定と強度推定

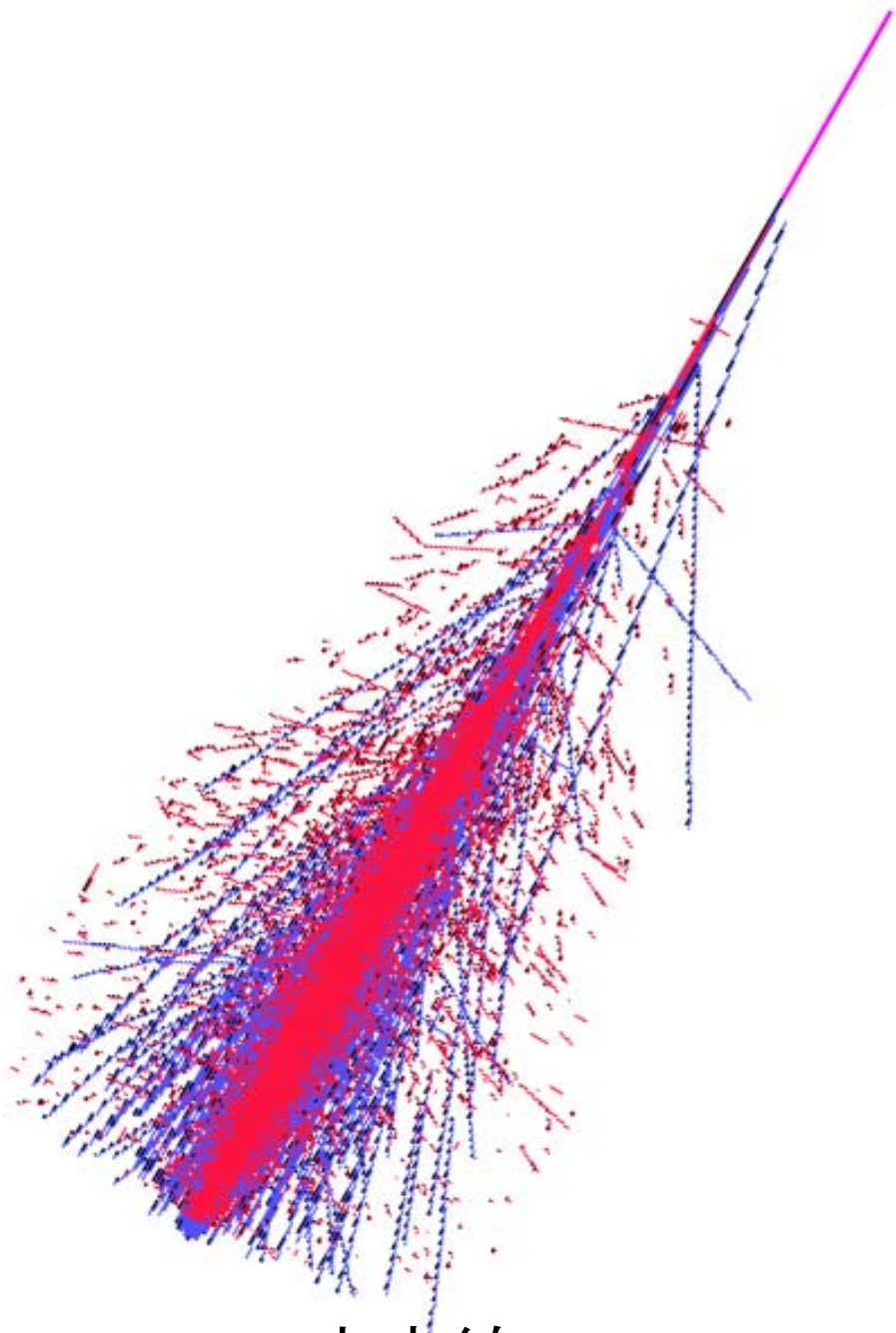
6. レーダー法と制動輻射受信法

付録: レーダー法学生実習

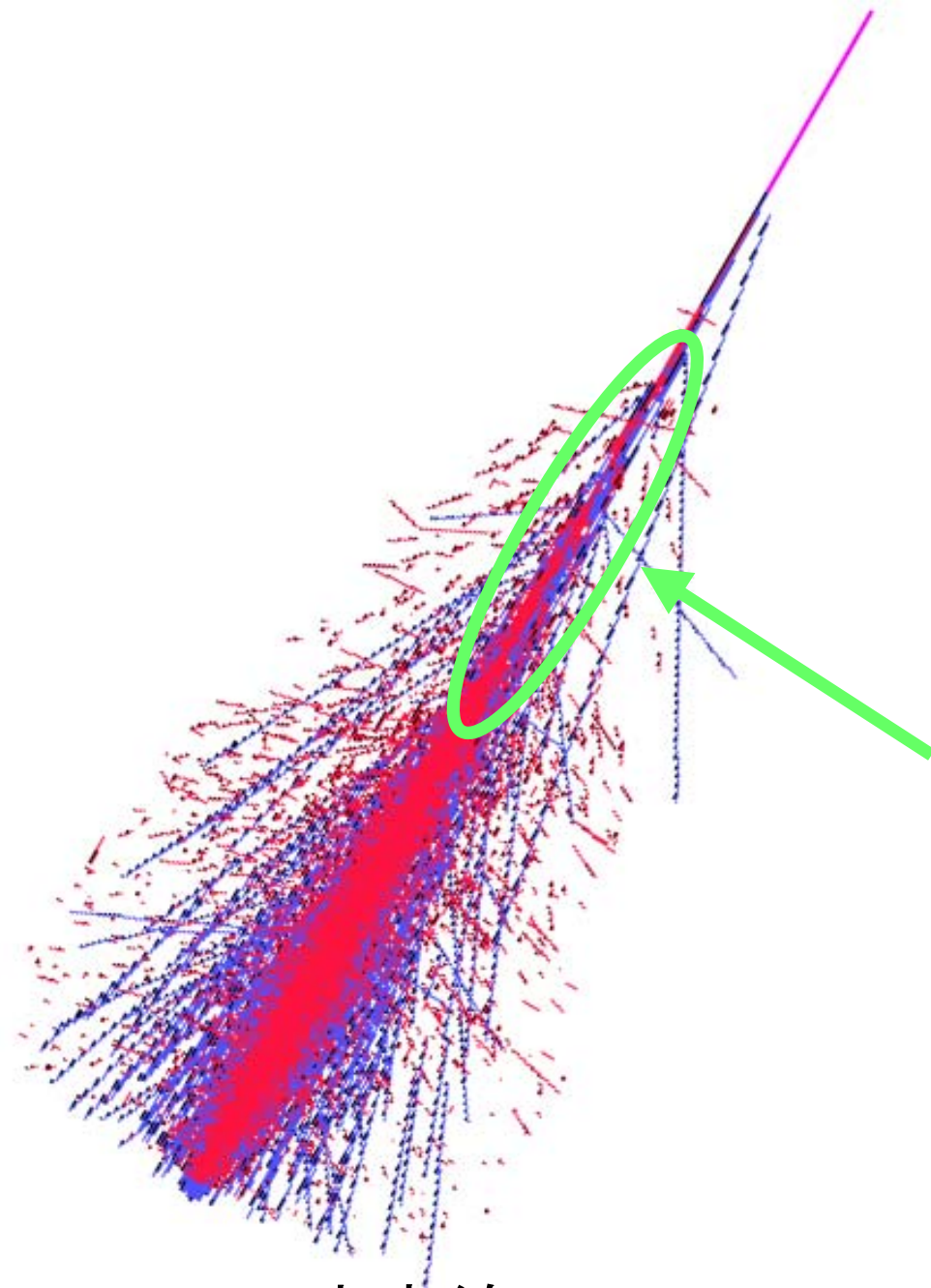
(駒場 全学体験セミナー)

done





宇宙線EAS



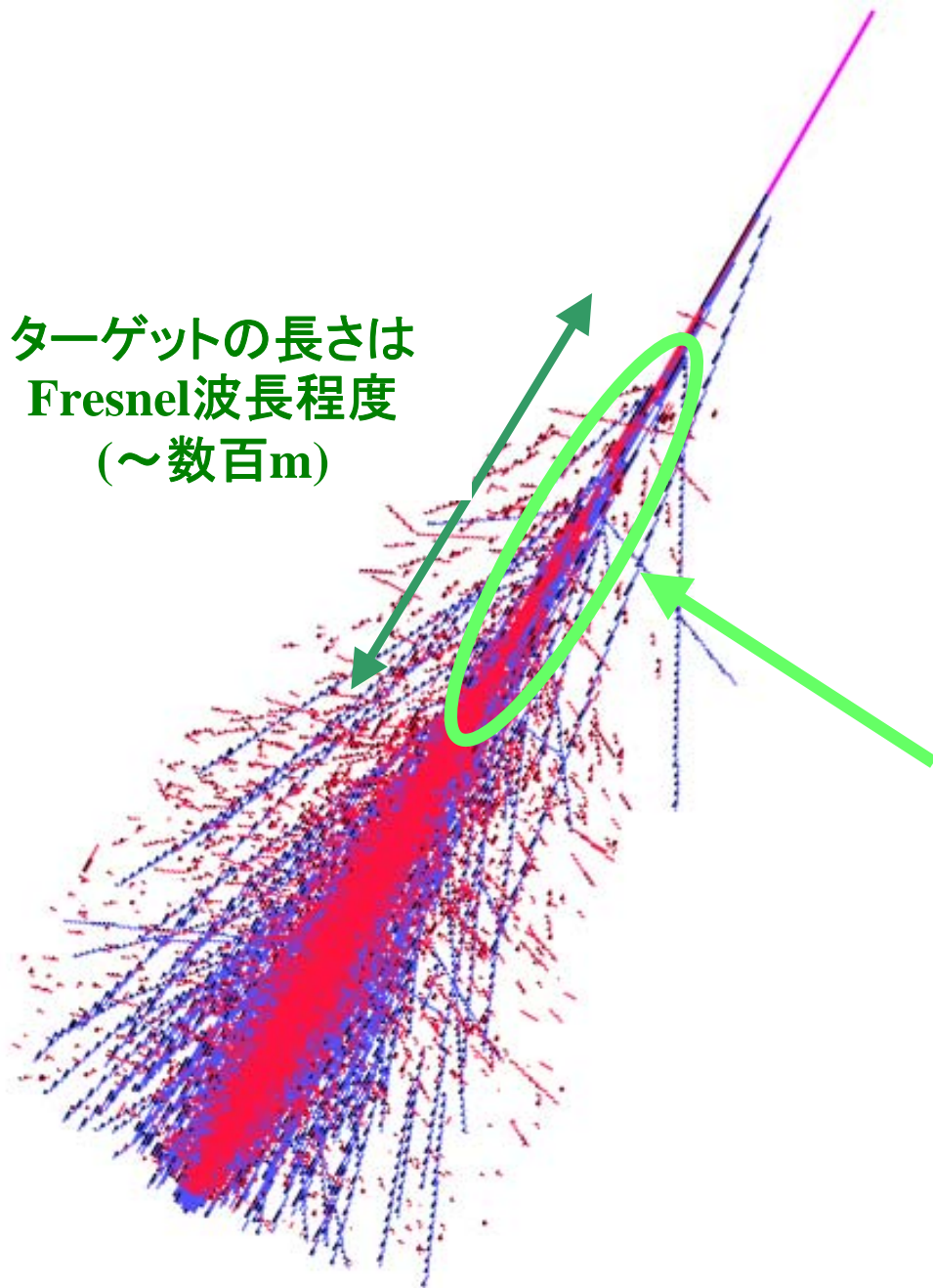
この部分にある準熱的～熱  
的電子からのレーダーエコー  
の検出を狙う。(EAS先端部  
にある相対論的電子からの  
エコーは強度が弱く、またドッ  
プラーシフトが大きすぎる。)

宇宙線EAS

ターゲットの長さは  
Fresnel波長程度  
(～数百m)

この部分にある準熱的～熱  
的電子からのレーダーエコー  
の検出を狙う。(EAS先端部  
にある相対論的電子からの  
エコーは強度が弱く、またドッ  
プラーシフトが大きすぎる。)

宇宙線EAS

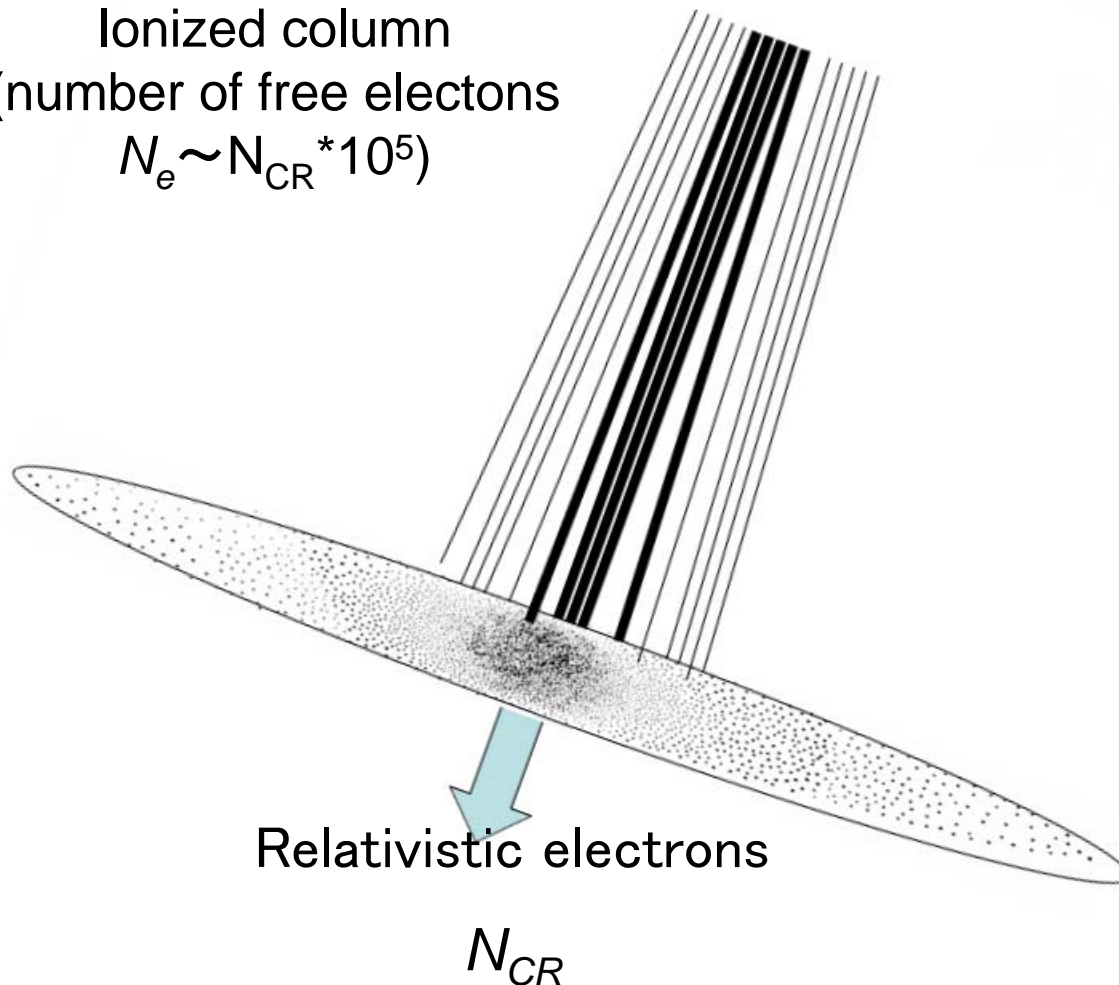


## Fresnel波長について

EAS後部にできた自由電子柱によるコヒーレント散乱の条件

EAS axis  $\perp$  propagation direction  
 $N_e$

Ionized column  
(number of free electrons  
 $N_e \sim N_{CR} * 10^5$ )

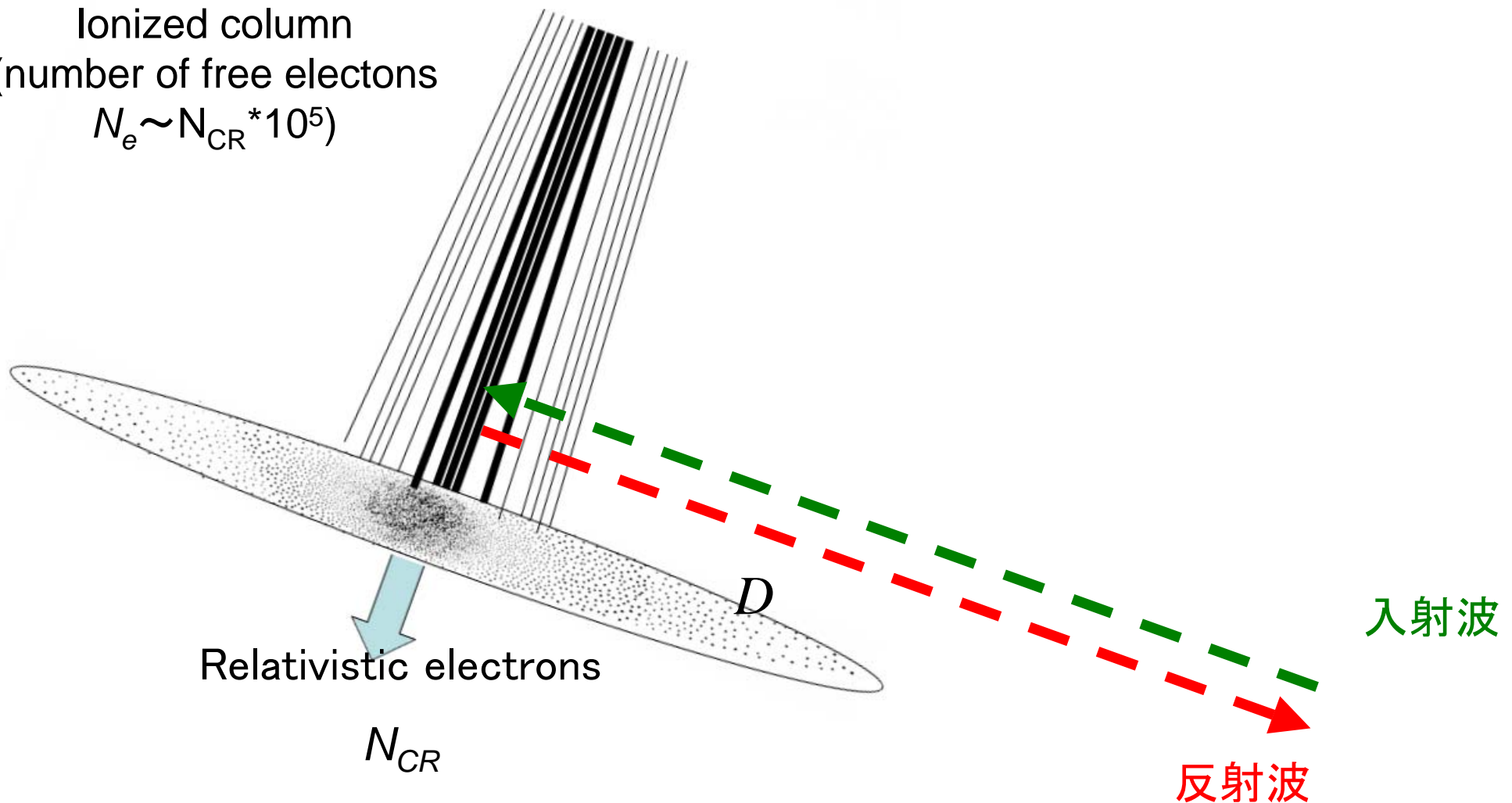


## Fresnel波長について

EAS後部にできた自由電子柱によるコヒーレント散乱の条件

EAS axis  $\perp$  propagation direction  
 $N_e$

Ionized column  
(number of free electrons  
 $N_e \sim N_{CR} * 10^5$ )



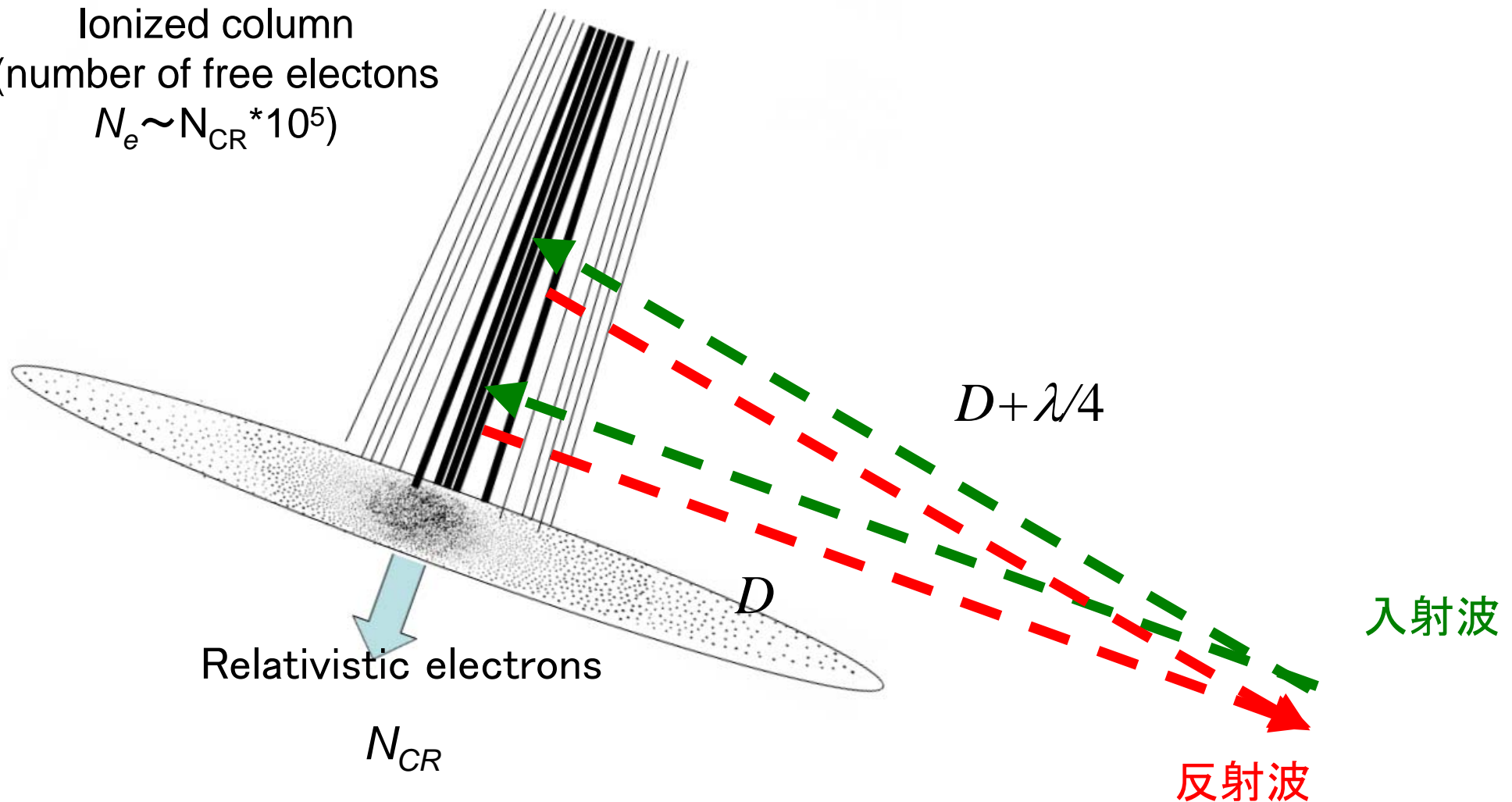


## Fresnel波長について

EAS後部にできた自由電子柱によるコヒーレント散乱の条件

EAS axis  $\perp$  propagation direction  
 $N_e$

Ionized column  
(number of free electrons  
 $N_e \sim N_{CR} * 10^5$ )

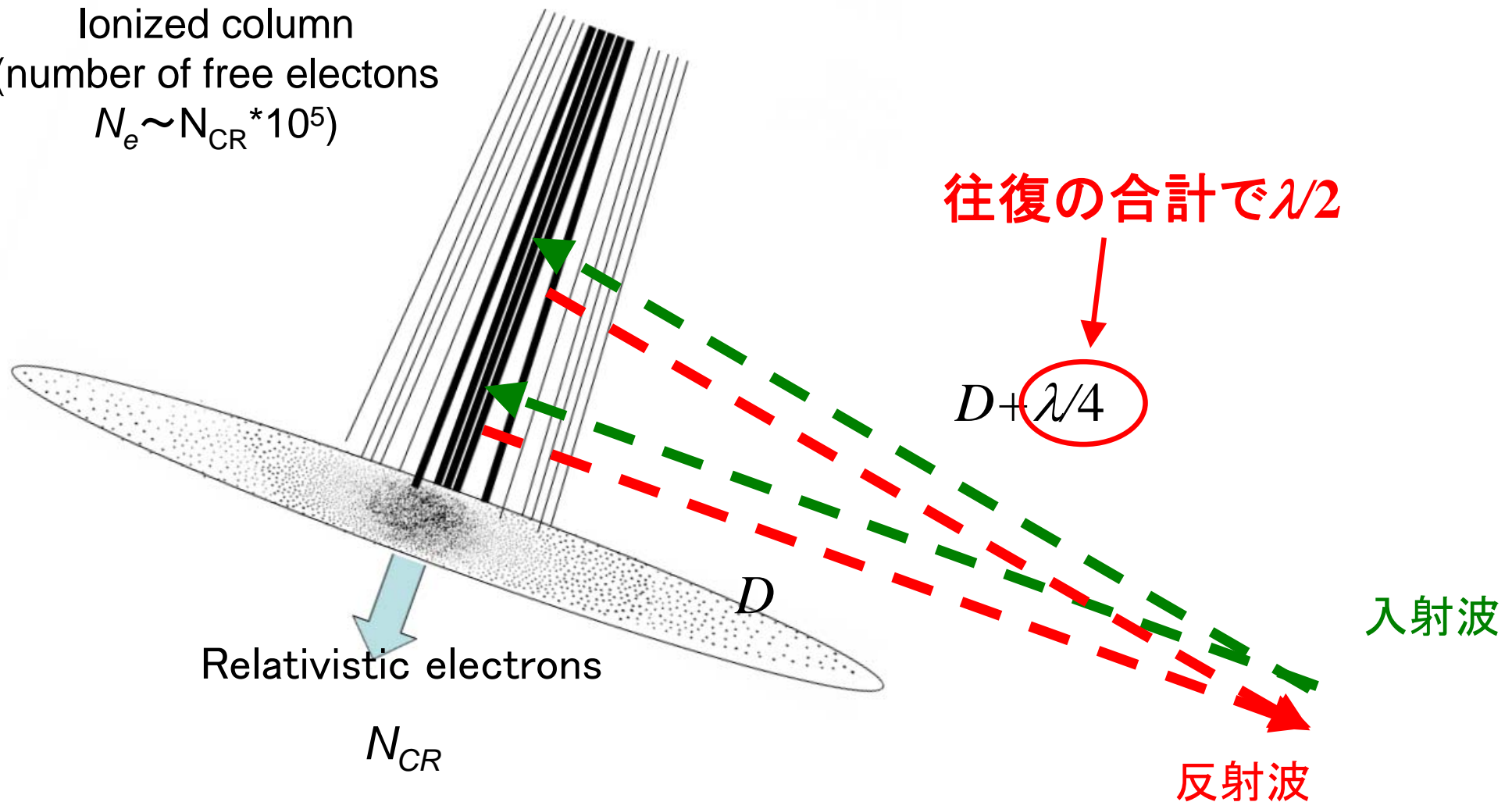


## Fresnel波長について

EAS後部にできた自由電子柱によるコヒーレント散乱の条件

EAS axis  $\perp$  propagation direction  
 $N_e$

Ionized column  
(number of free electrons  
 $N_e \sim N_{CR} * 10^5$ )



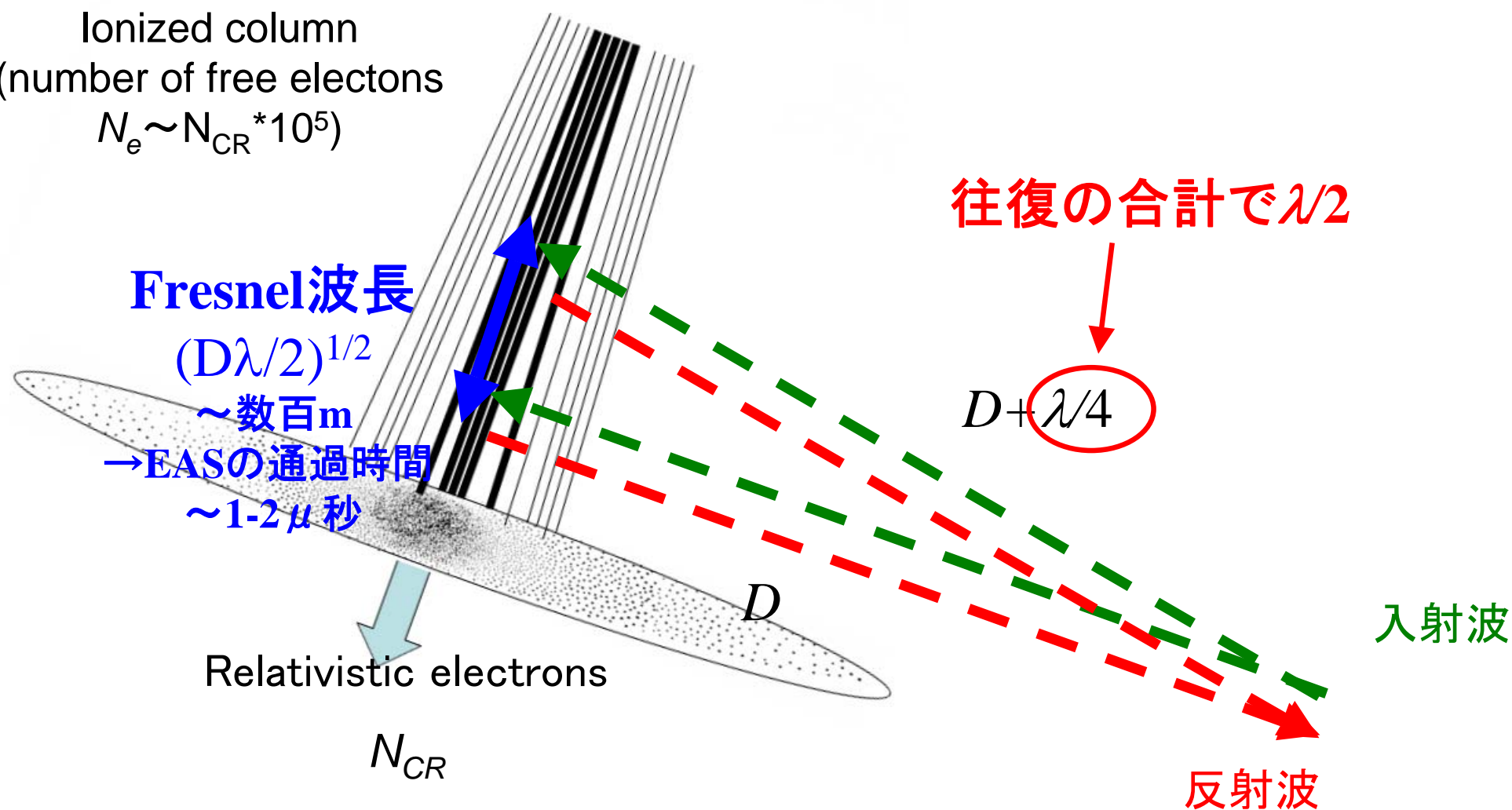


## Fresnel波長について

EAS後部にできた自由電子柱によるコヒーレント散乱の条件

EAS axis  $\perp$  propagation direction  
 $N_e$

Ionized column  
(number of free electrons  
 $N_e \sim N_{CR} * 10^5$ )



## 時間スケールについて

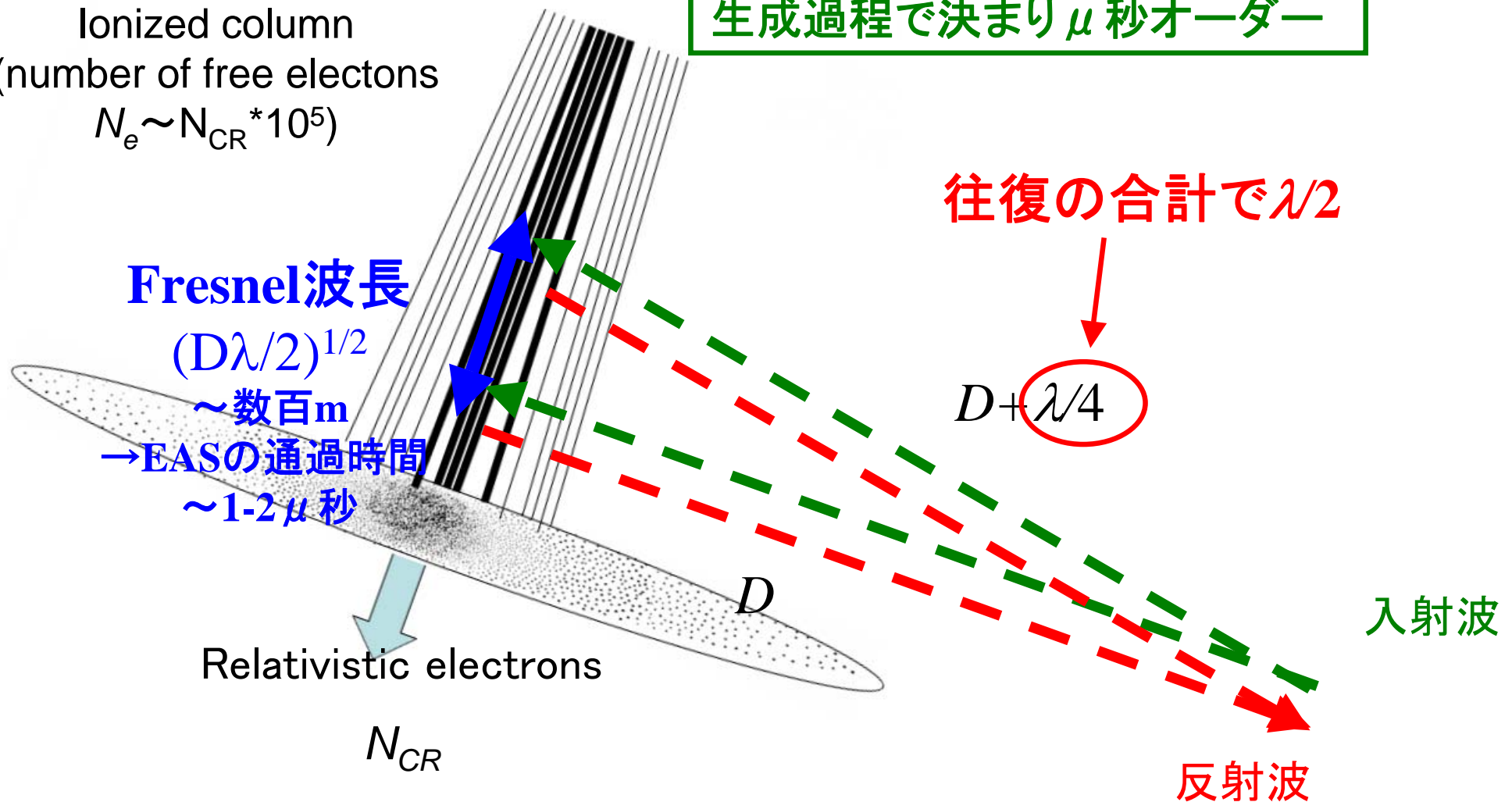
EAS後部にできた自由電子柱によるコヒーレント散乱の条件

EAS axis  $\perp$  propagation direction

$N_e$

熱的電子の寿命は酸素負イオン  
生成過程で決まり  $\mu$  秒オーダー

Ionized column  
(number of free electrons  
 $N_e \sim N_{CR} * 10^5$ )



## 時間スケールについて

EAS後部にできた自由電子柱によるコヒーレント散乱の条件

EAS axis  $\perp$  propagation direction

$N_e$

熱的電子の寿命は酸素負イオン  
生成過程で決まり  $\mu$  秒オーダー

Ionized column  
(number of free electrons  
 $N_e \sim N_{CR} * 10^5$ )

Fresnel波長

$$(D\lambda/2)^{1/2}$$

~数百m

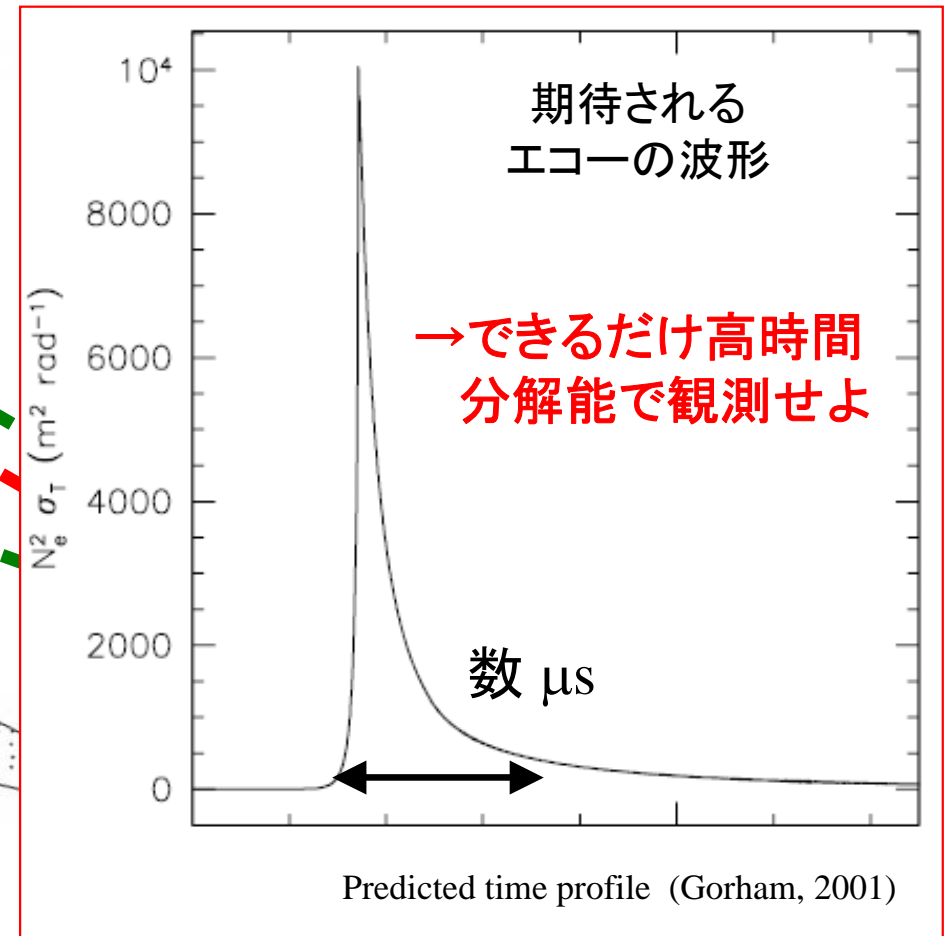
→EASの通過時間

~1-2  $\mu$  秒

Relativistic electrons

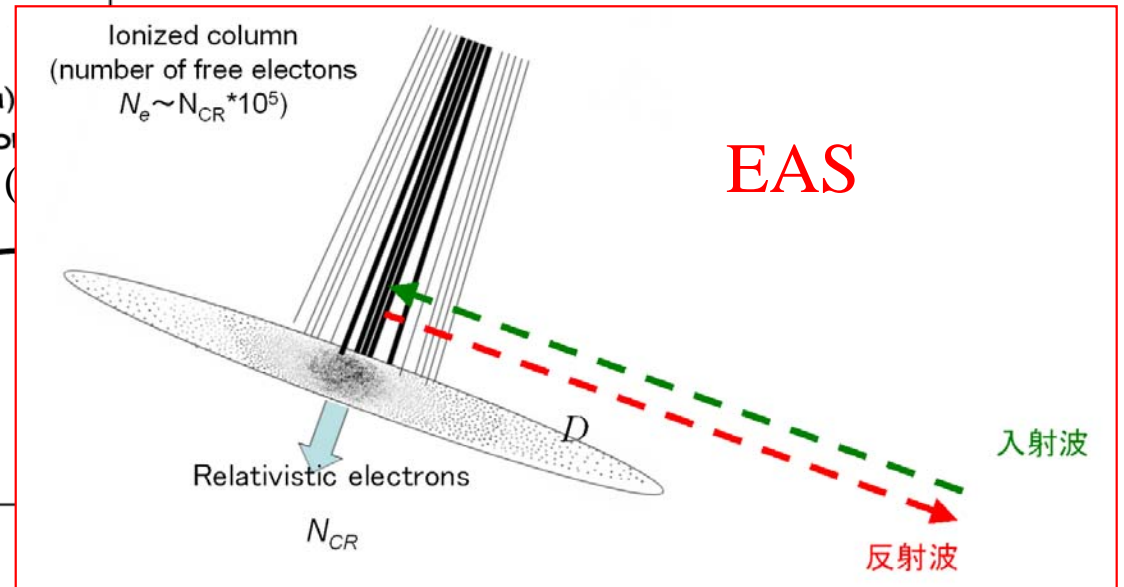
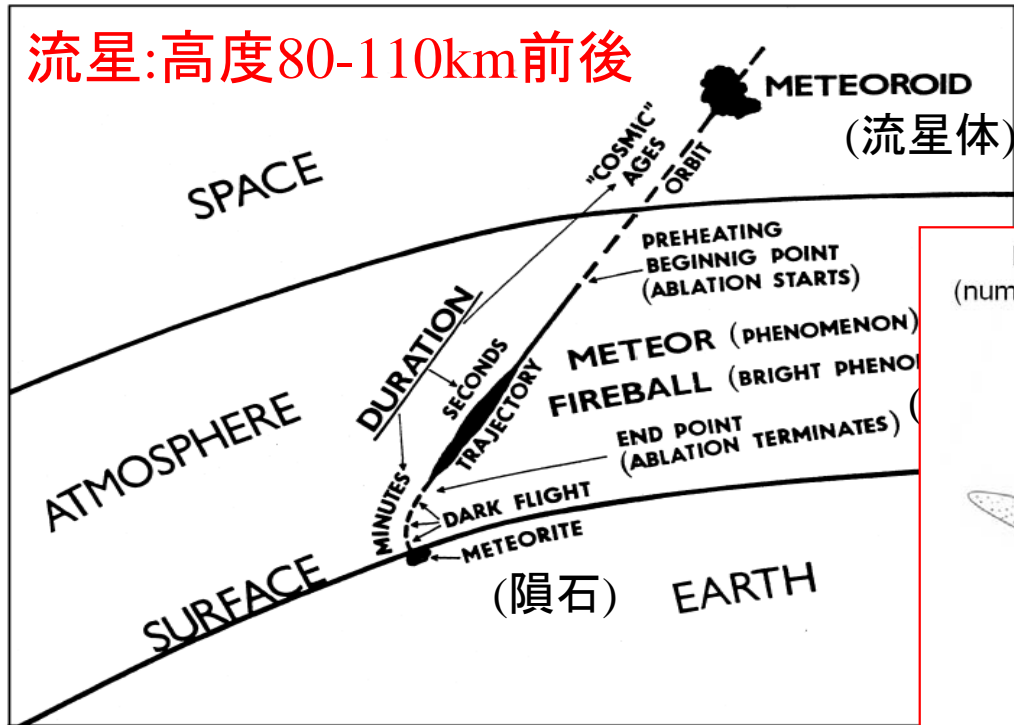
$N_{CR}$

$D$



# 流星 vs. 宇宙線

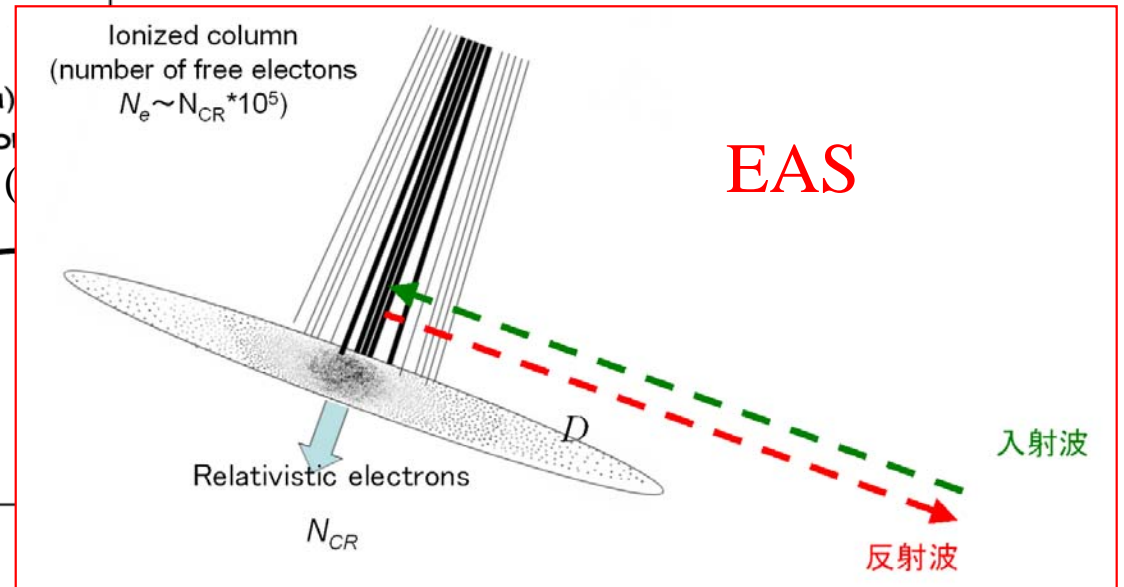
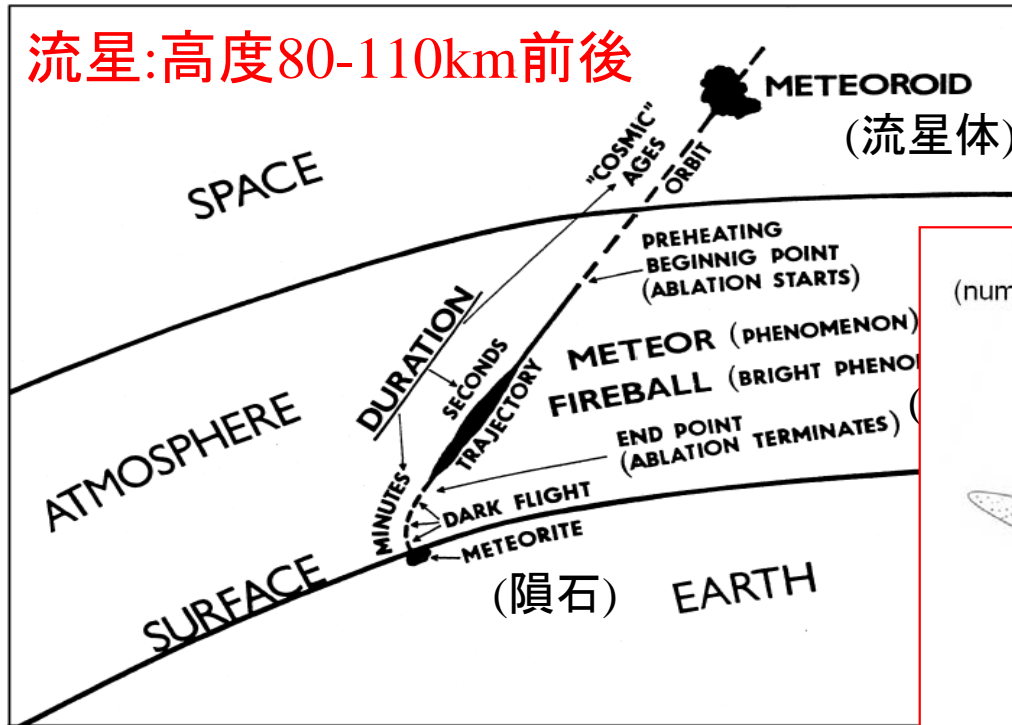
流星:高度80-110km前後



# 流星 vs. 宇宙線

数  $\mu\text{g}$  の塵 vs. 陽子(or Fe?)

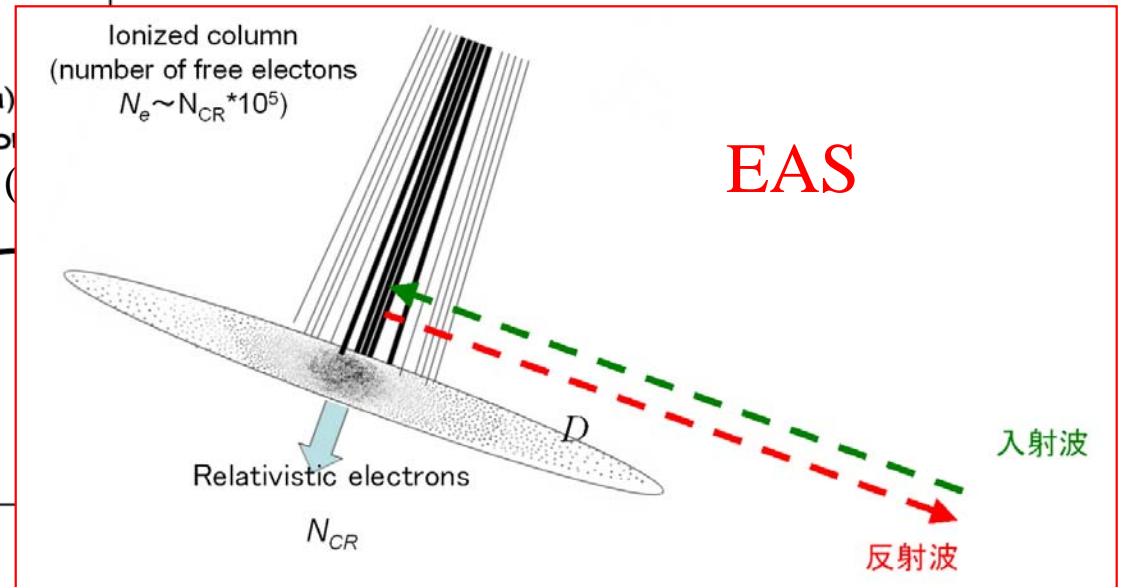
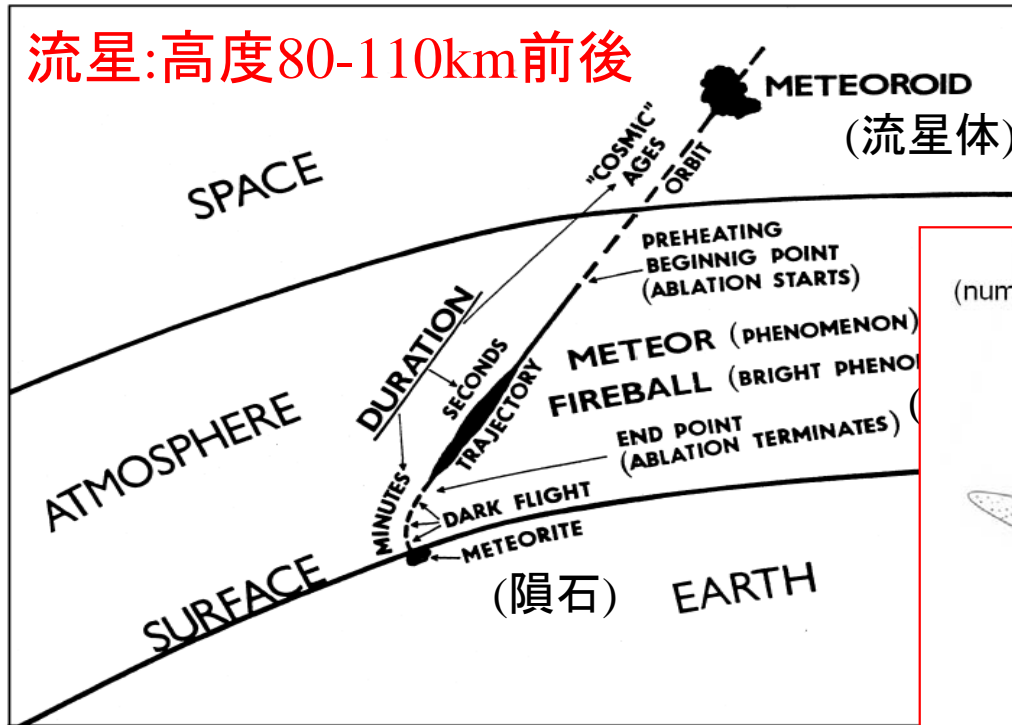
流星: 高度80-110km前後



# 流星 vs. 宇宙線

数  $\mu\text{g}$  の塵 vs. 陽子(or Fe?)

流星: 高度80-110km前後



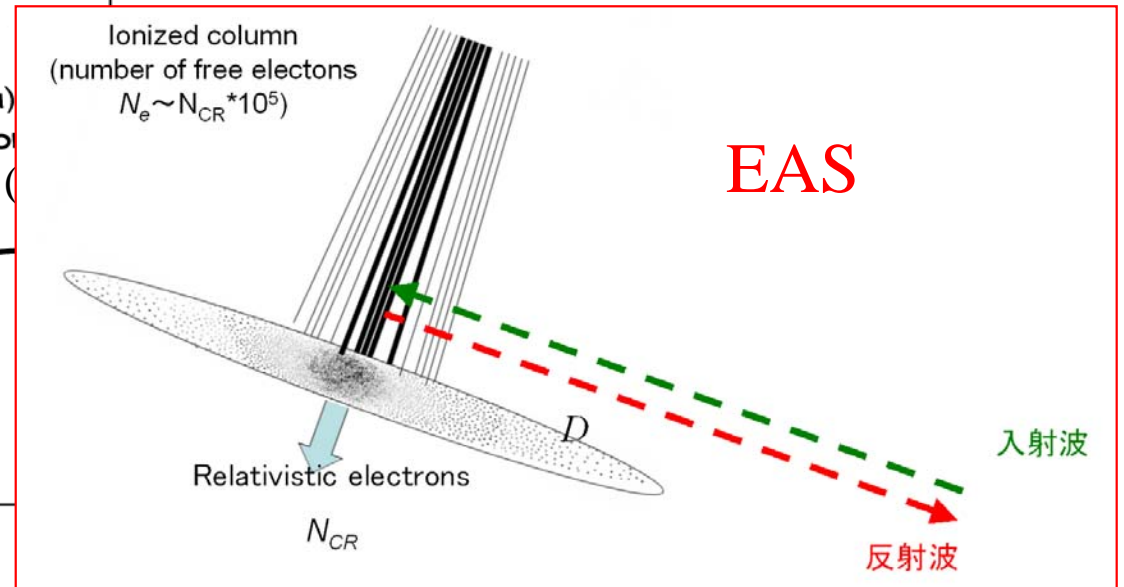
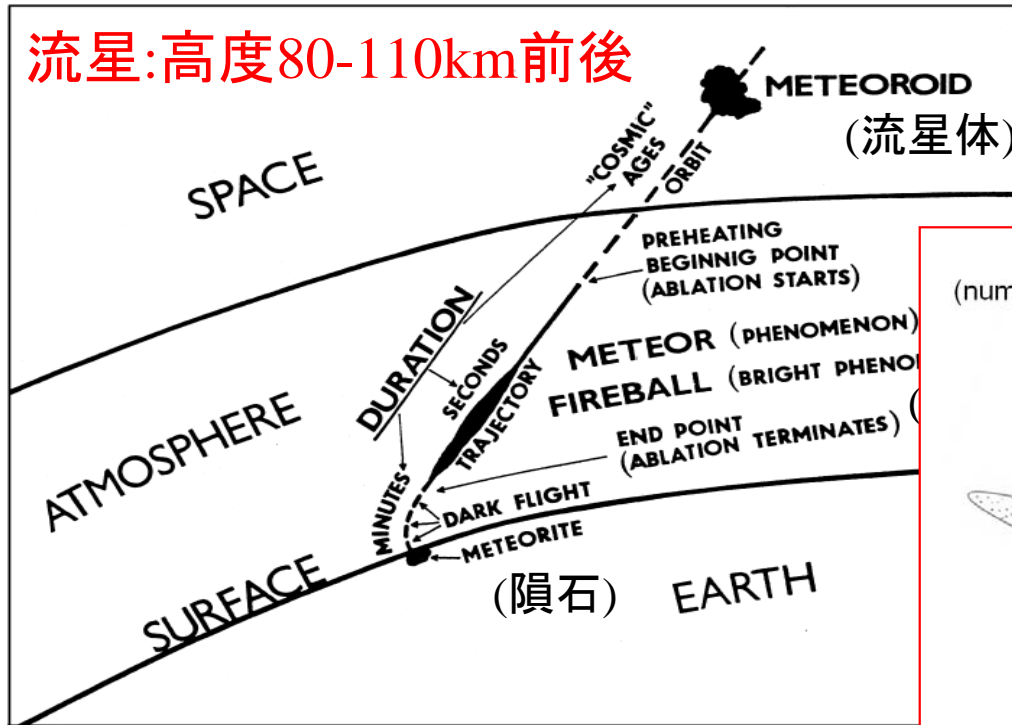
エネルギー的には似たようなもの  
(数十分の1J~十数J)



# 流星 vs. 宇宙線

数  $\mu\text{g}$  の塵 vs. 陽子(or Fe?)

流星: 高度80-110km前後

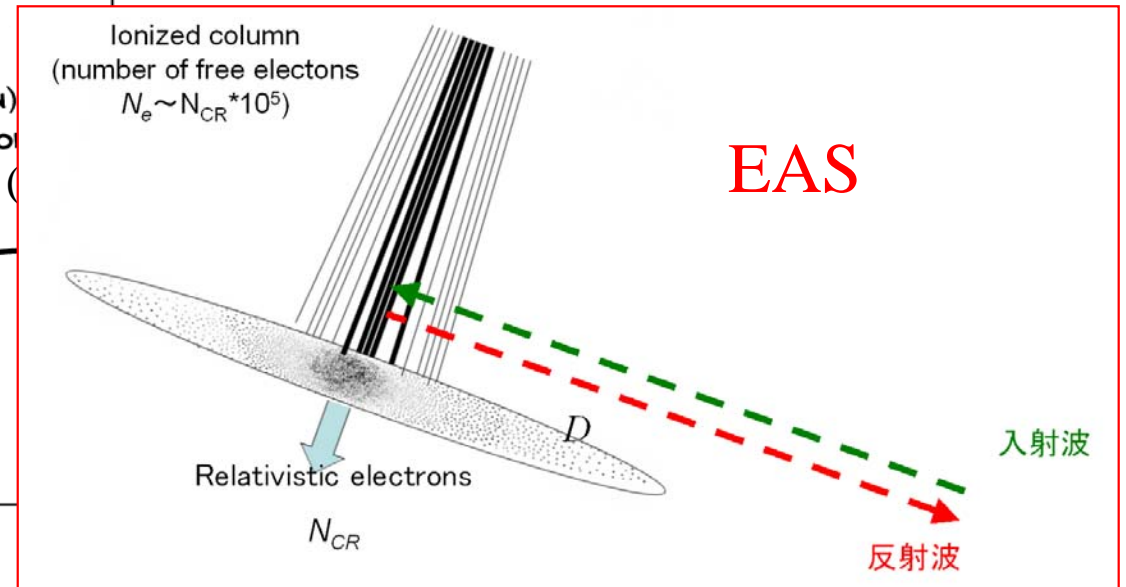
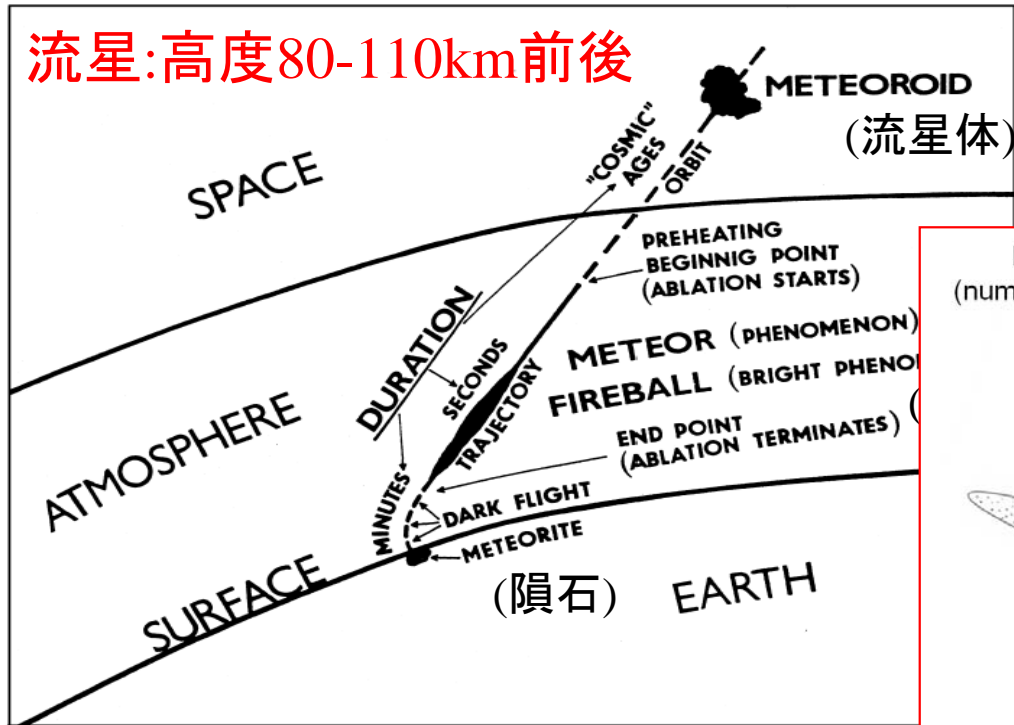


エネルギー的には似たようなもの  
(数十分の1J~十数J)

→大気中でおこす電離: 同一規模

数  $\mu\text{g}$  の塵 vs. 陽子 (or Fe?)

数  $\mu\text{g}$  の塵 vs. 陽子(or Fe?)



エネルギー的には似たようなもの  
(数十分の1J～十数J)

→大気中でおこす電離:同一規模

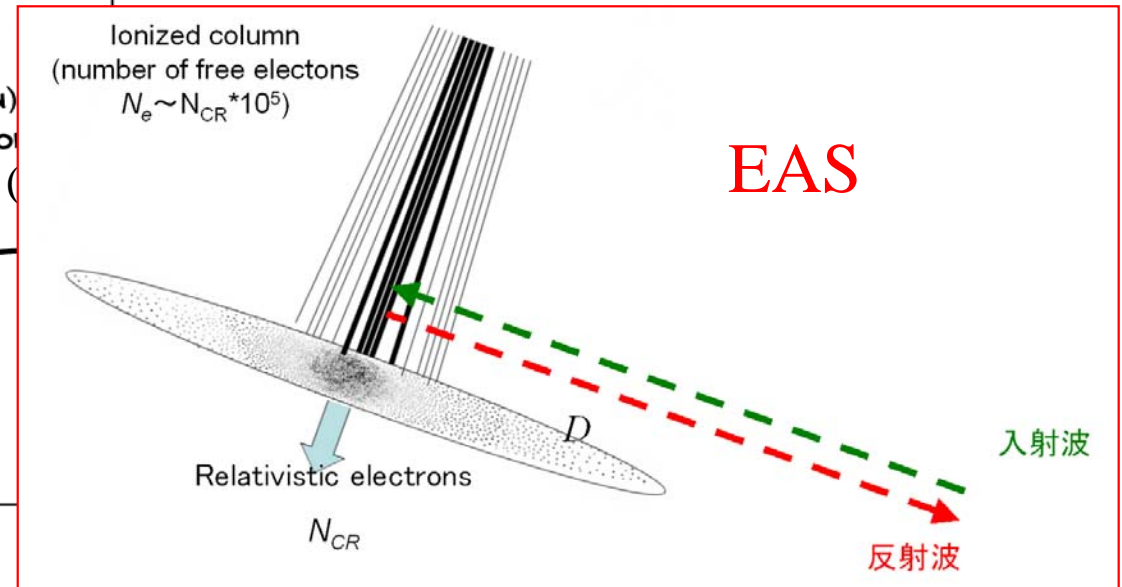
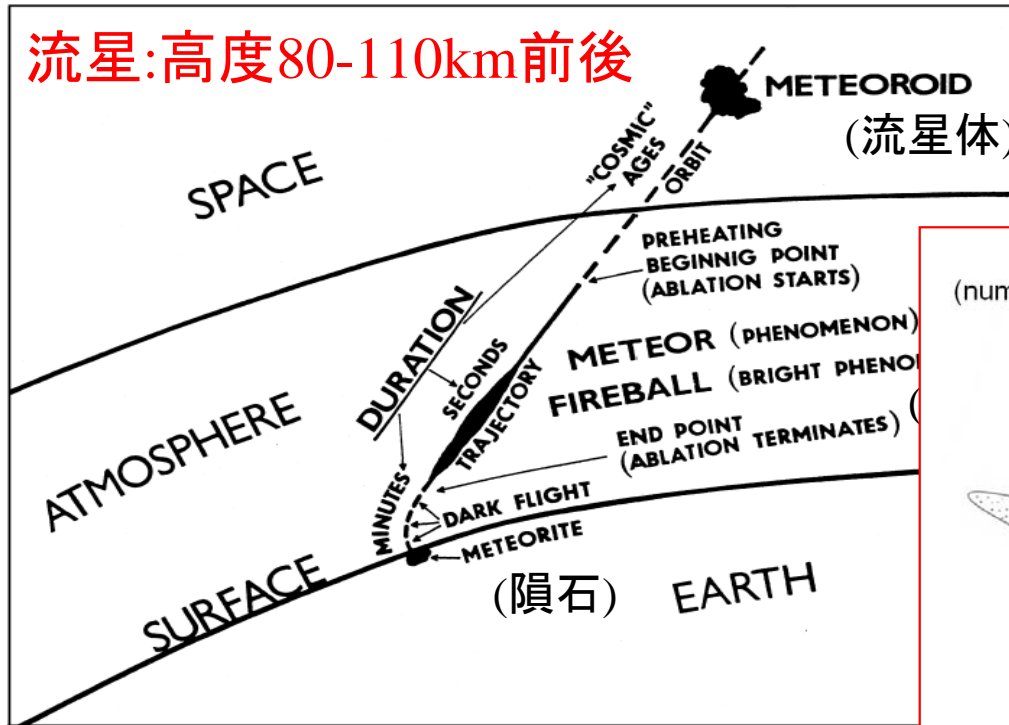
流星のレーダー観測は確立した手段→宇宙線に応用できるだろう



# 流星 vs. 宇宙線

数  $\mu\text{g}$  の塵 vs. 陽子(or Fe?)

流星: 高度80-110km前後



エネルギー的には似たようなもの  
(数十分の1J~十数J)

→大気中でおこす電離: 同一規模

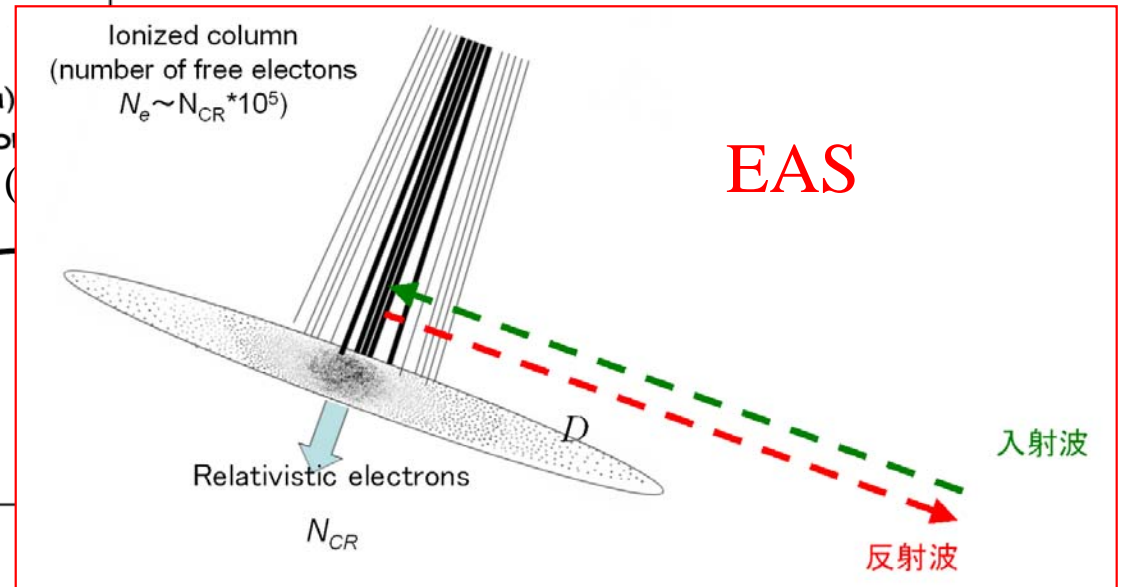
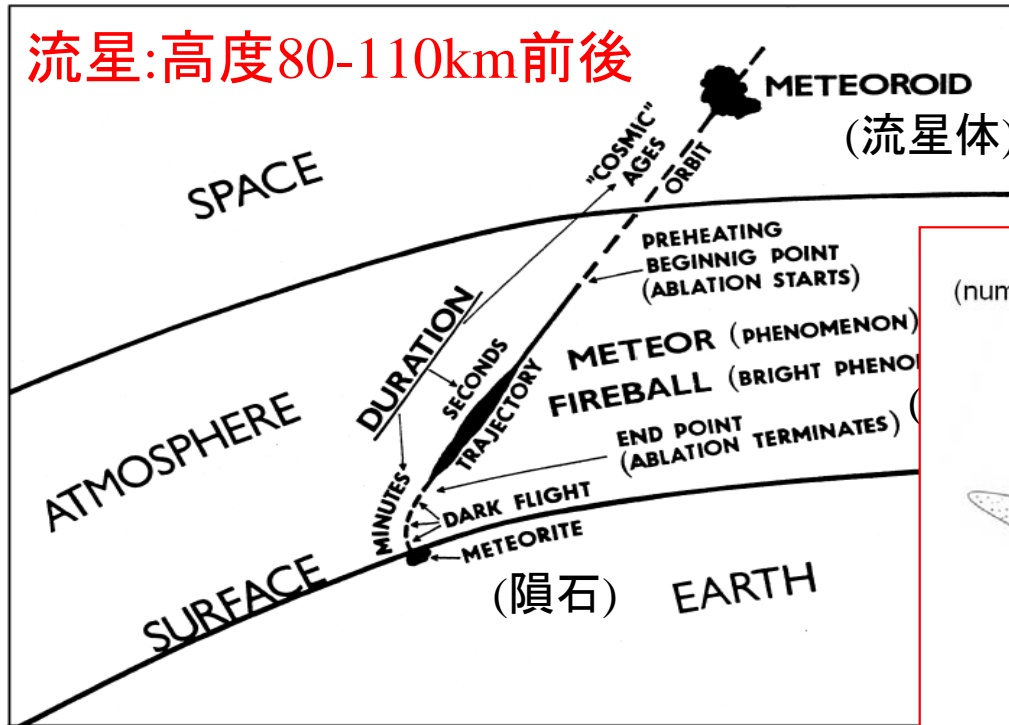
流星のレーダー観測は確立した手段→宇宙線に応用できるだろう

Gorhamがこのアイデアをまとめた(2001, Astroparticlephys.)

# 流星 vs. 宇宙線

数  $\mu\text{g}$  の塵 vs. 陽子(or Fe?)

流星: 高度80-110km前後



エネルギー的には似たようなもの  
(数十分の1J~十数J)

→大気中でおこす電離:同一規模

流星のレーダー観測は確立した手段→宇宙線に応用できるだろう

Gorhamがこのアイデアをまとめた(2001, Astroparticlephys.)

R/Dの状況: 2007 ICRCでは1件の報告あり(ペルー、ヒカマルカ・レーダー)、  
2009 ICRCでは我々の報告のみ

# 目次

1. Introduction
2. 宇宙線のさまざまな電波観測手段
3. レーダー法の原理
4. 京大信楽MUレーダー概要
5. 宇宙線エコー候補  
その同定と強度推定
6. レーダー法と制動輻射受信法

付録: レーダー法学生実習  
(駒場 全学体験セミナー)

done





# 京大信楽MULレーダー





# 京大信楽MULレーダー





# 京大信楽MULレーダー



MU radar=Middle and Upper atmosphere radar

もともとは大気・電離層研究のためのレーダー









もともとは大気・電離層研究のためのレーダー





もともとは大気・電離層研究のためのレーダー



# 京大信楽MULレーダー



Active phased array of  
475 Yagis antennas  
Effective area: 8330m<sup>2</sup>  
Freq: 46.5MHz ( $\lambda=6.45\text{m}$ )  
Beam width: 3.6度  
peak power: 1MW  
Average power: 50 kW

MU radar=Middle and Upper atmosphere radar

もともとは大気・電離層研究のためのレーダー



# 京大信楽MULレーダー



Active phased array of  
475 Yagis antennas  
Effective area: 8330m<sup>2</sup>  
Freq: 46.5MHz ( $\lambda=6.45\text{m}$ )  
Beam width: 3.6度  
peak power: 1MW  
Average power: 50 kW

MU radar=Middle and Upper atmosphere radar

もともとは大気・電離層研究のためのレーダー



# 京大信楽MULレーダー



Active phased array of  
475 Yagis antennas  
Effective area: 8330m<sup>2</sup>  
Freq: 46.5MHz ( $\lambda=6.45\text{m}$ )  
Beam width: 3.6度  
peak power: 1MW  
Average power: 50 kW

475素子干渉計を構成

MU radar=Middle and Upper atmosphere radar

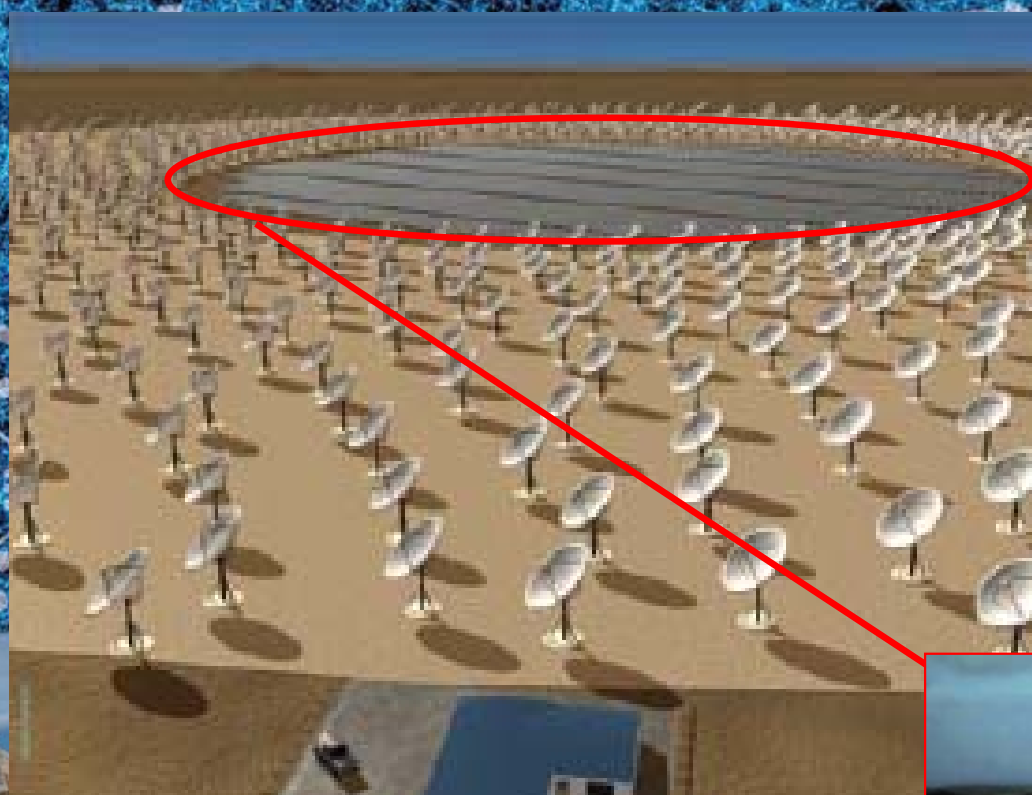
もともとは大気・電離層研究のためのレーダー



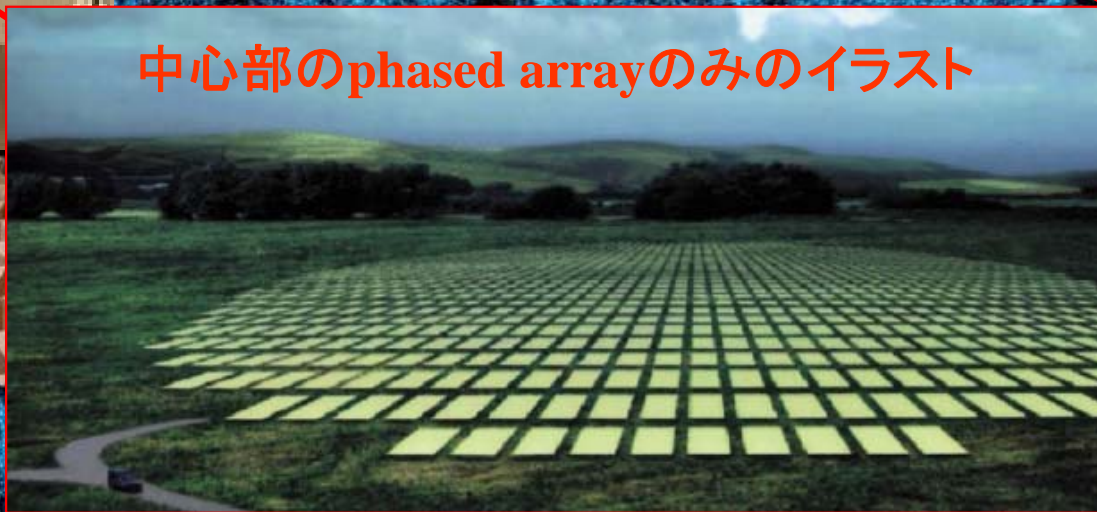
# The Square Kilometre Array

The International Radio Telescope for the 21st Century

<http://www.skatelescope.org/>



中心部のphased arrayのみのイラスト





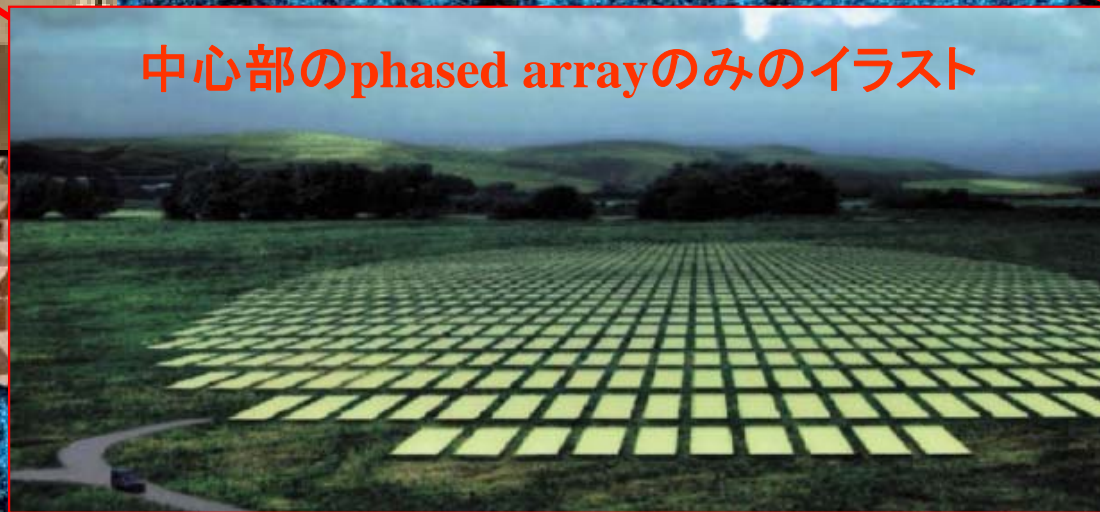
# The Square Kilometre Array

The International Radio

MU

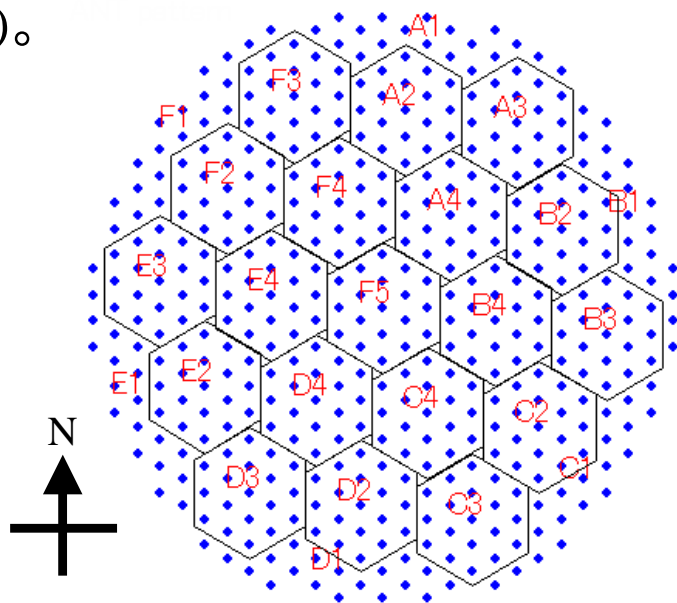


中心部のphased arrayのみのイラスト





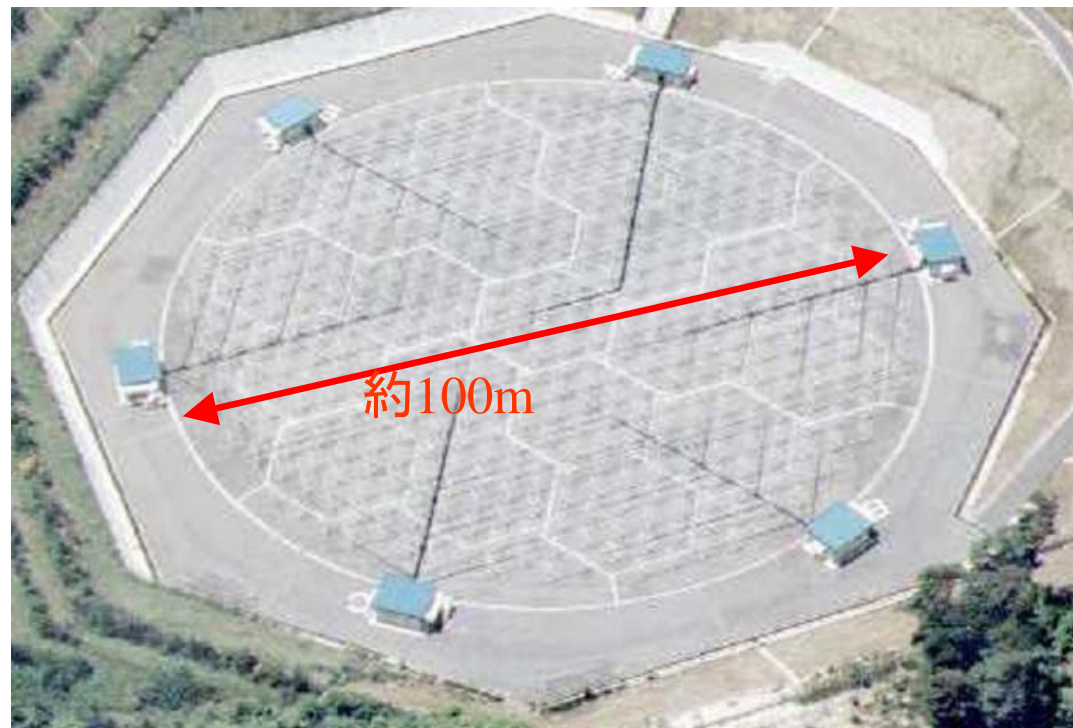
3素子クロス八木アンテナを19組ずつに束ね1群とし、それが全部で25群ある(19×25=475組のアンテナ)。



25群全体で直径D=約100mの円内に配置。  
波長6.4m, アンテナ間隔は4.5m。

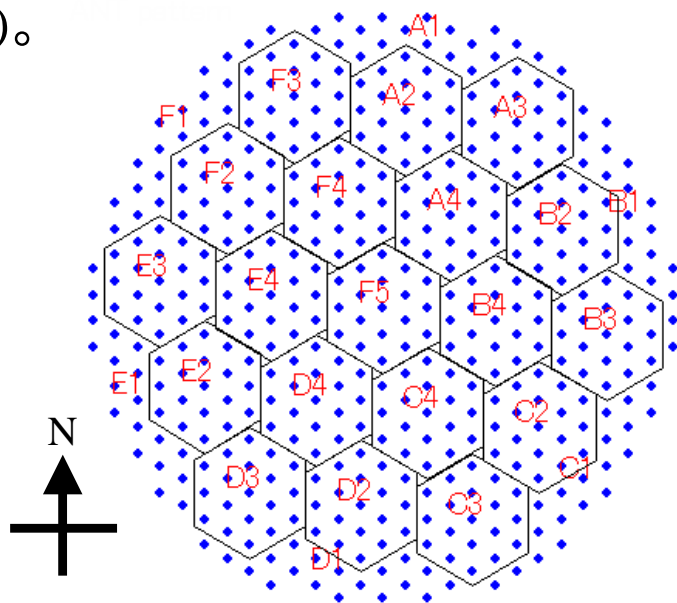
角分解能  $\lambda/D \sim 3.6$ 度

## MUレーダー中心部拡大図





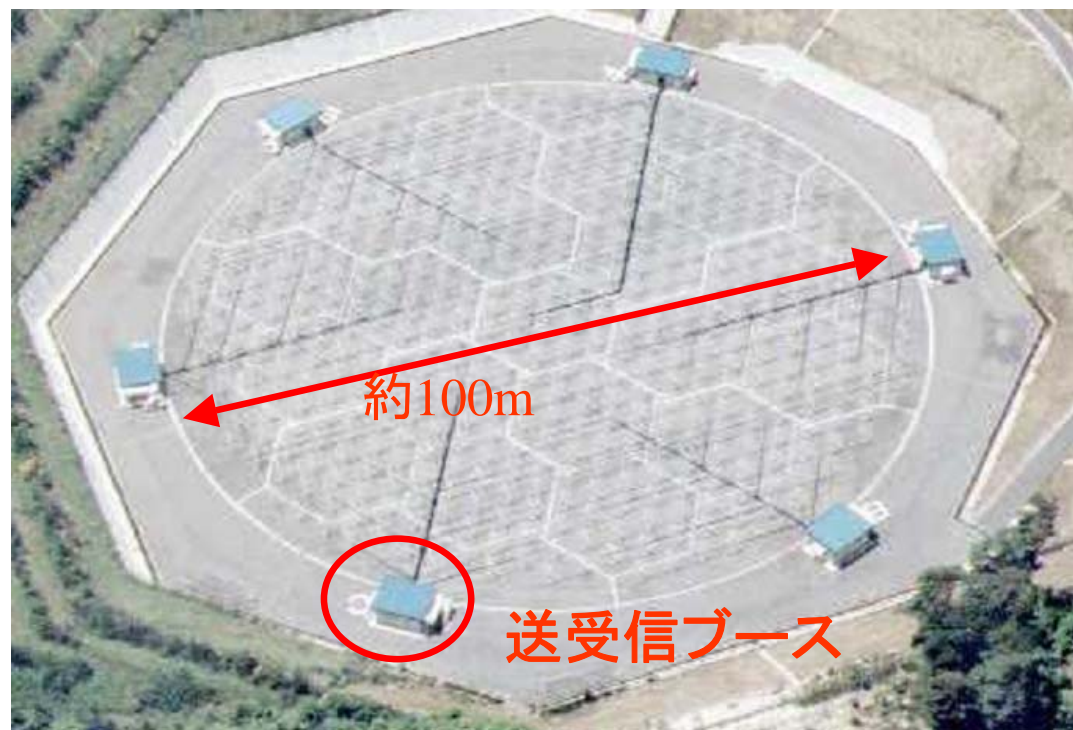
3素子クロス八木アンテナを19組ずつに束ね1群とし、それが全部で25群ある(19×25=475組のアンテナ)。



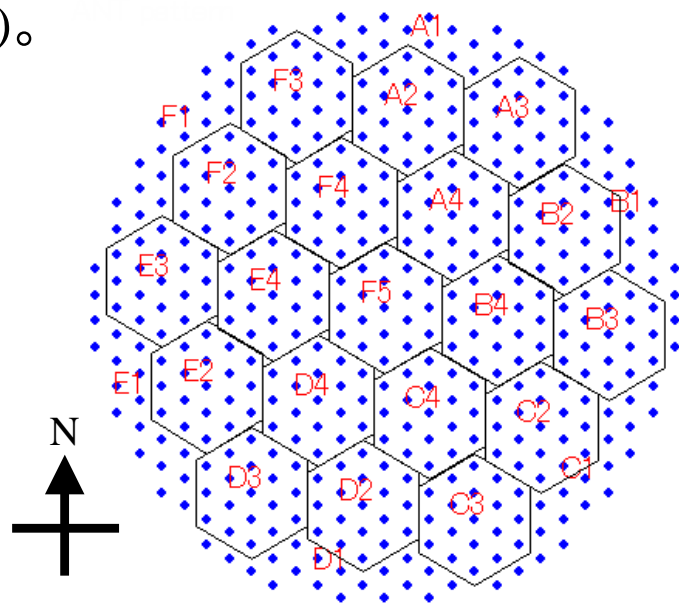
25群全体で直径D=約100mの円内に配置。  
波長6.4m, アンテナ間隔は4.5m。

角分解能  $\lambda/D \sim 3.6$ 度

## MUレーダー中心部拡大図



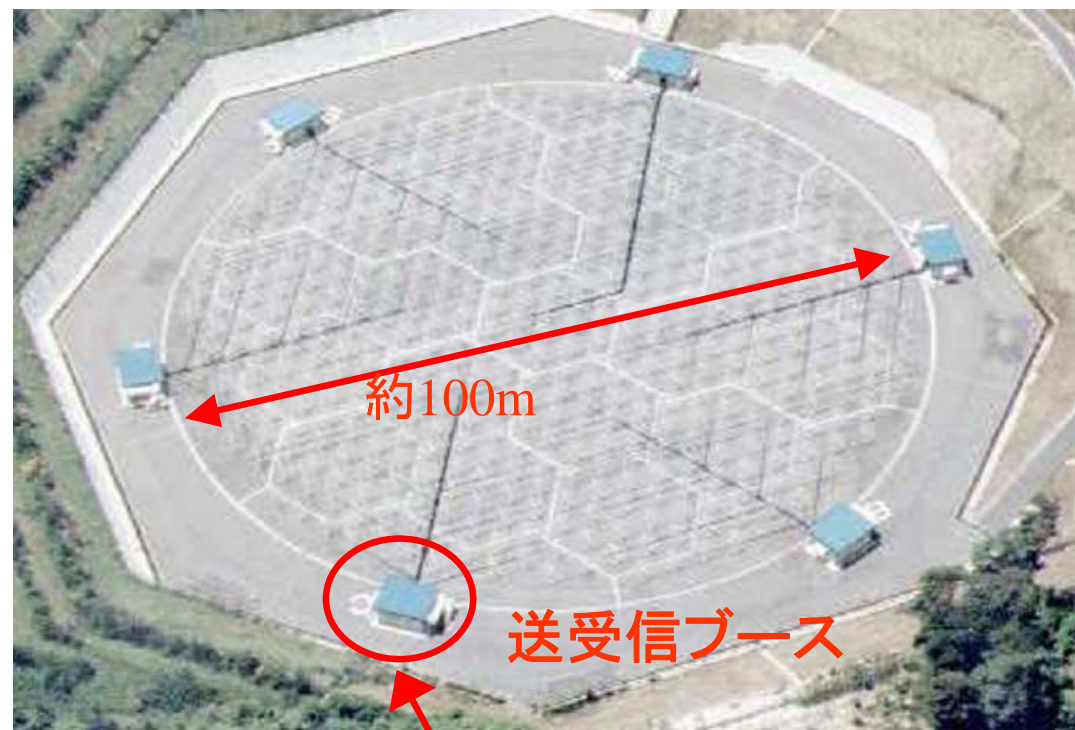
3素子クロス八木アンテナを19組ずつに束ね1群とし、それが全部で25群ある(19×25=475組のアンテナ)。



25群全体で直径D=約100mの円内に配置。  
波長6.4m, アンテナ間隔は4.5m。

角分解能  $\lambda/D \sim 3.6$ 度

## MUレーダー中心部拡大図



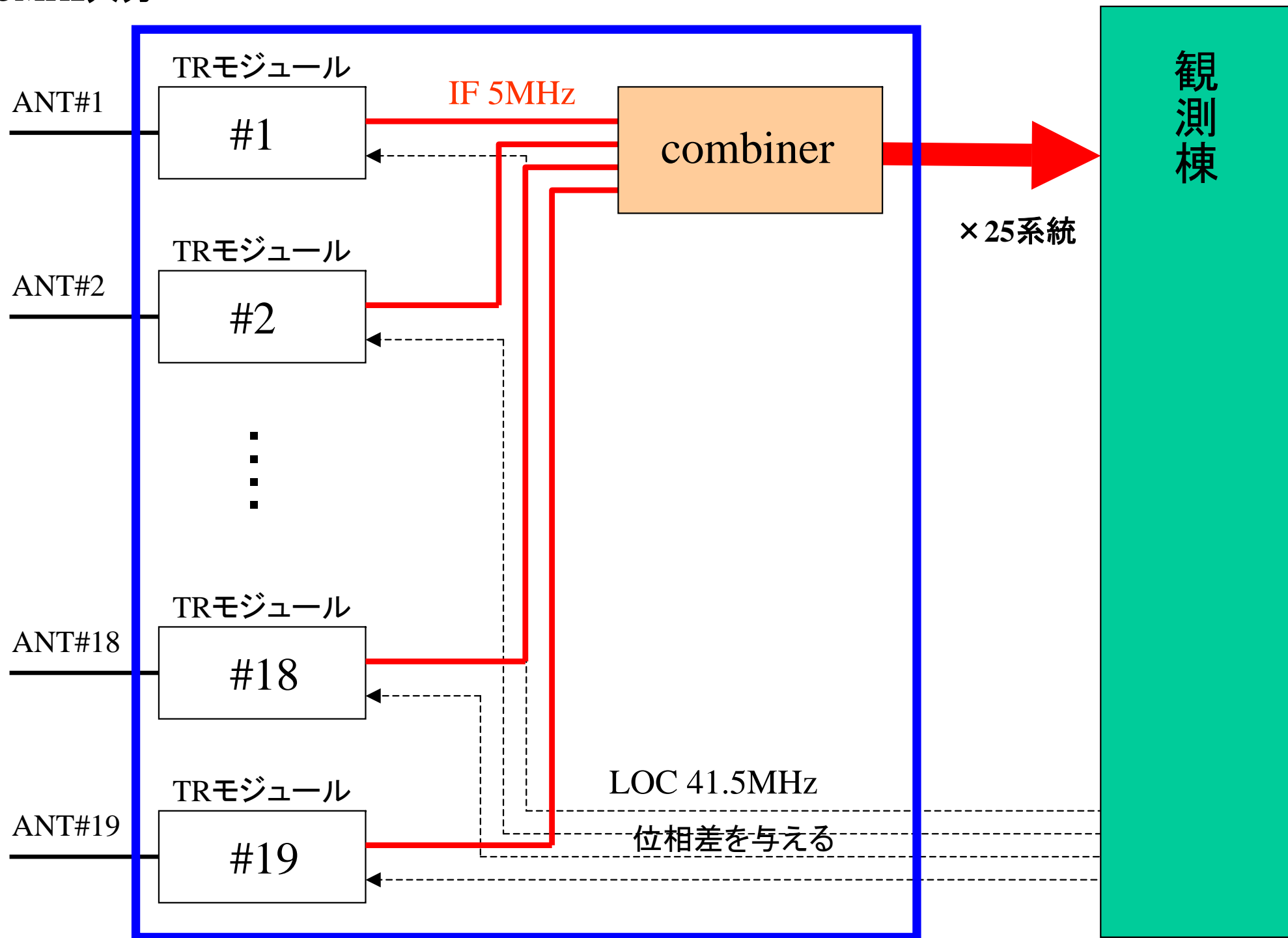
### MUレーダー送受信ブース内

ブースは6箇所あり、25群を4群、4群、4群、4群、4群、5群に分けて収容  
(A1-A4,B1-B4,C1-C4,D1-D4,E1-E4,F1-F5)



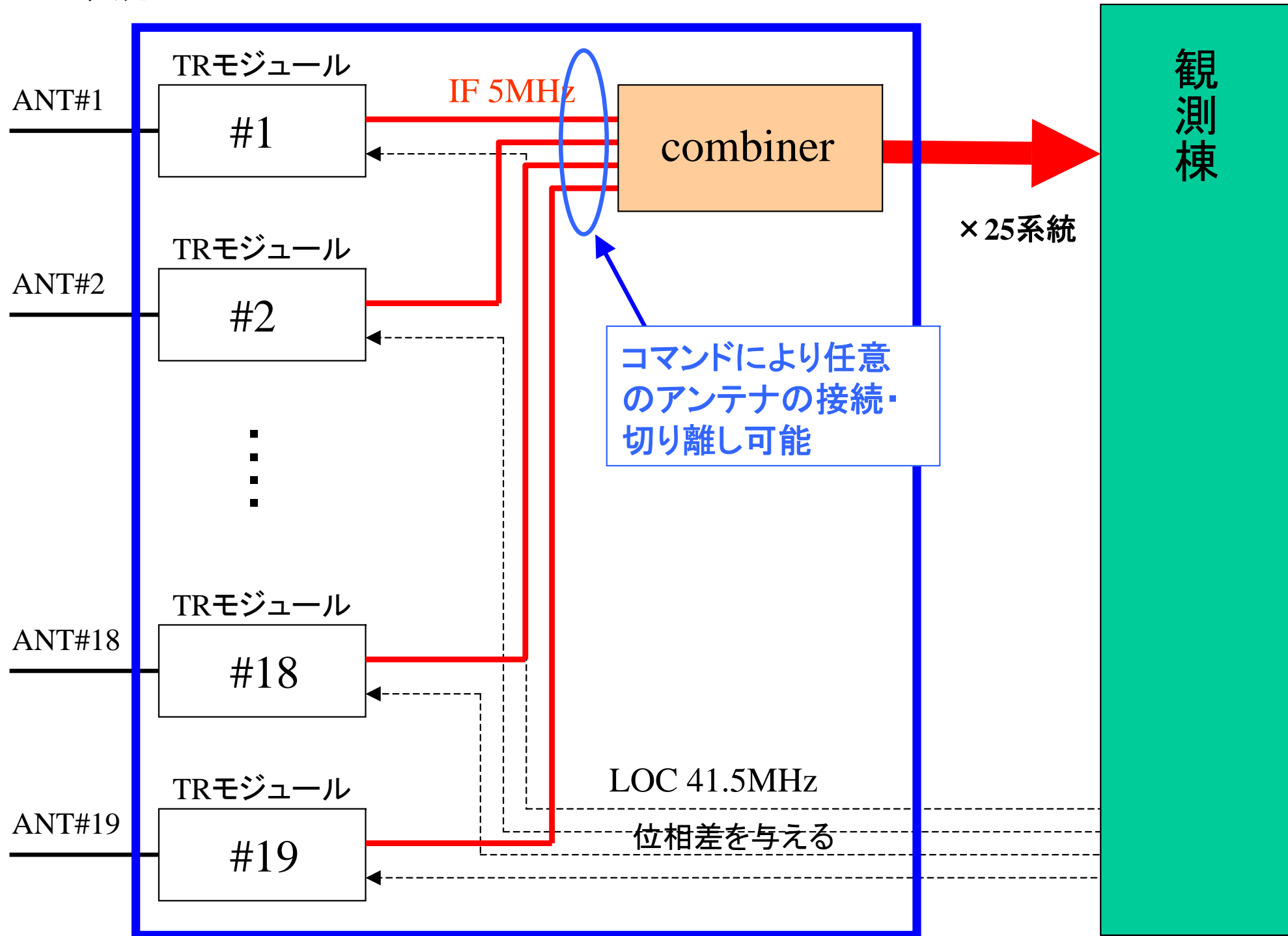
46.5MHz入力

## 25群の各群のブース内での結線(受信時)



46.5MHz入力

## 25群の各群のブース内での結線(受信時)

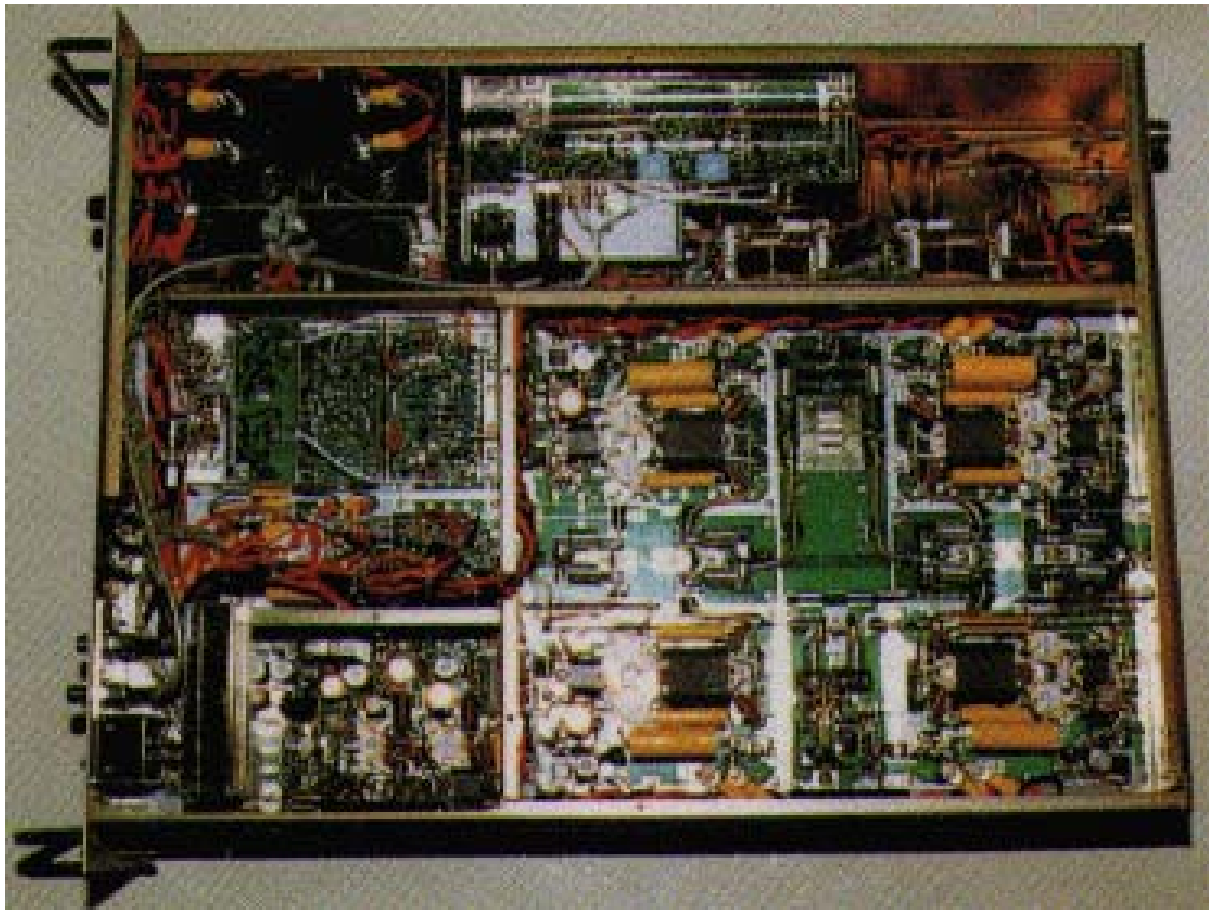


## TRモジュール

各アンテナ素子に取り付けた合計475個の 半導体小型送信機 (TRモジュール)群で送信を行います。これにより

○電波のビームを任意の方向にすばやく向けることができますから、風や乱流の立体構造がわかります。

○分割してそれぞれ独立なレーダーとしても使うことができますから、種々の複雑な観測が可能です。



MUレーダーのために開発  
された半導体小型送受信機  
TRモジュール

縦 55cm × 横 60cm × 厚さ 14cm

IF 5MHz

観測棟

CPU  
デジタル記録システム

25群

⋮

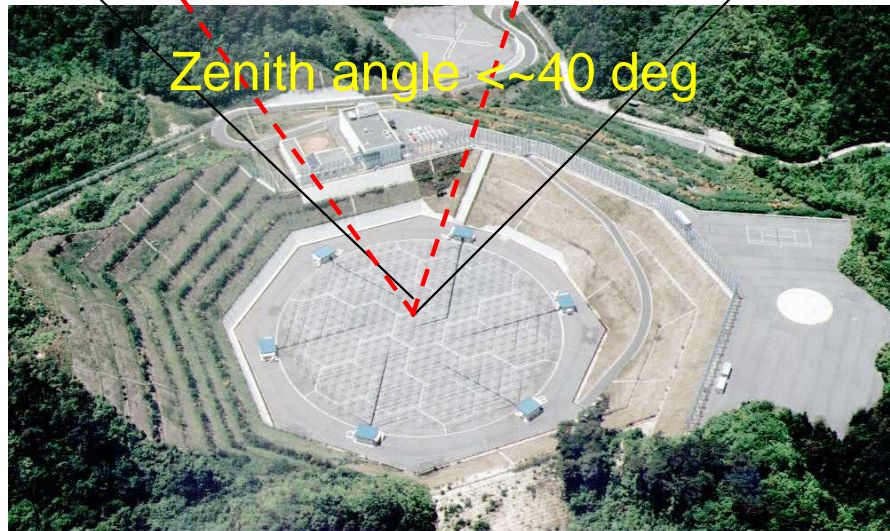
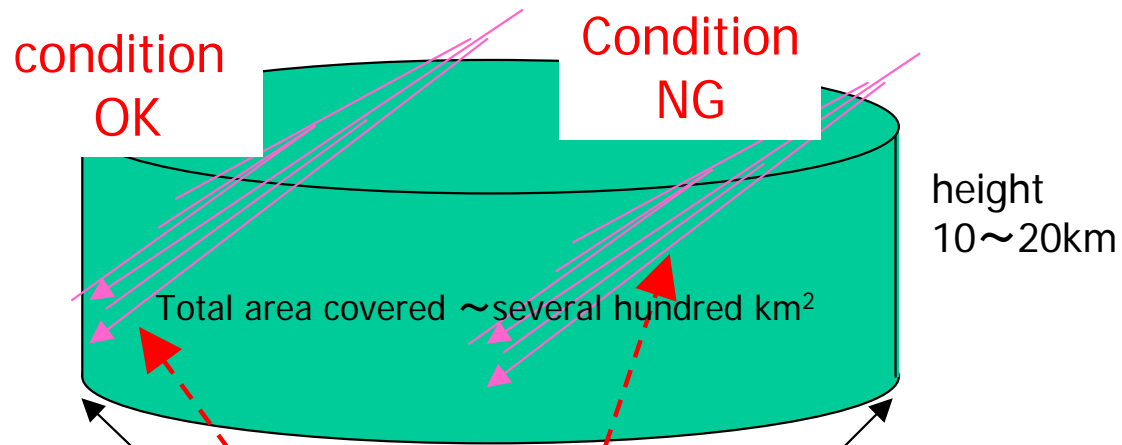
サンプリング時間  
 $2^0 \sim 5 \mu \text{秒} = 1 \sim 32 \mu \text{秒}$   
サンプリング周波数  
 $1 \text{MHz} \sim 31.25 \text{kHz}$

↑  
それに応じてIFの帯域を  
自動切り替え



## What is our target?

EAS axis  $\perp$  propagation direction



Shigaraki MU radar

Geometrical condition  
satisfied

$\sim 5\%$

Limitation for backscatter radar

Limitation of pulse radar  
duty ratio is 5% or less

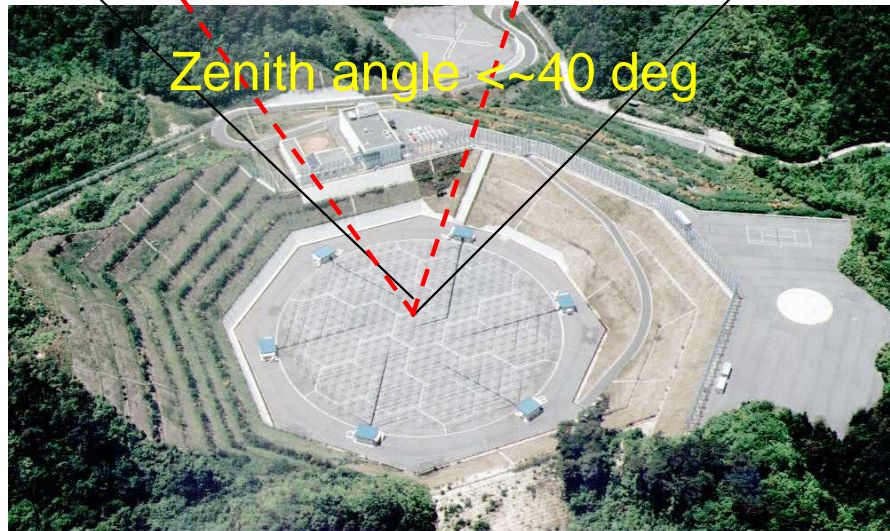
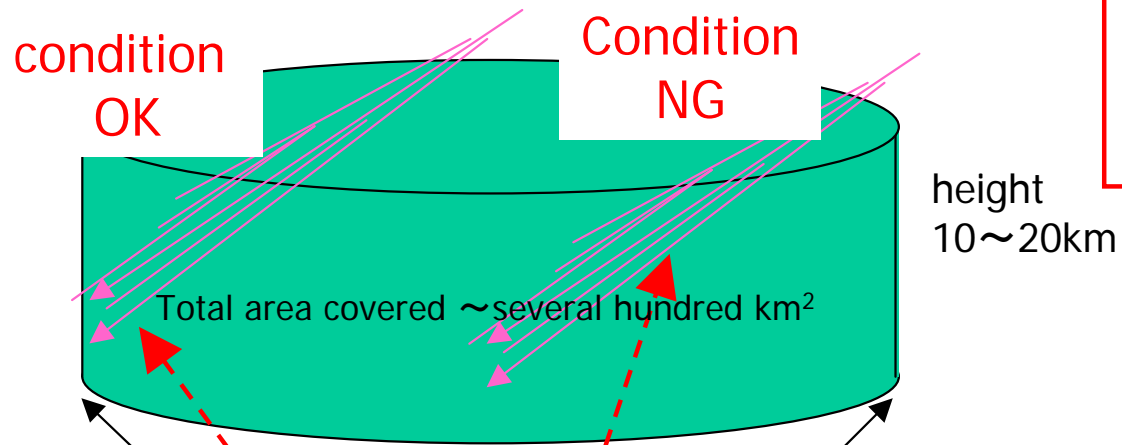
Number of CRs to be detected by the MU  
radar ( $0.05^2 = 1/400$  of incident CRs)

$>10^{17}$ eV	several tens/day
$>10^{17.5}$ eV	several/day
$>10^{18}$ eV	several $10^{-1}$ /day
$>10^{18.5}$ eV	several $10^{-2}$ /day



## What is our target?

EAS axis  $\perp$  propagation direction



Shigaraki MU radar

Geometrical condition  
satisfied

~ 5%

Limitation for backscatter radar

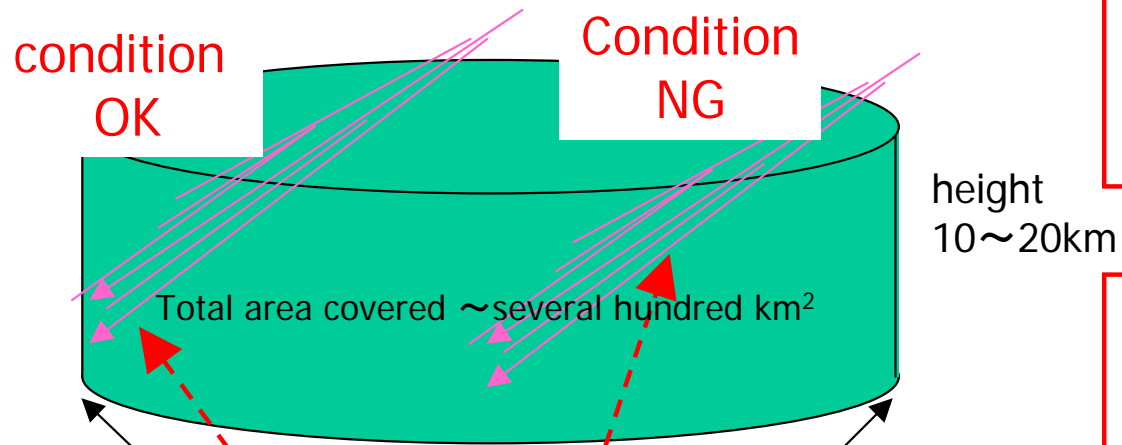
Limitation of pulse radar  
duty ratio is 5% or less

Number of CRs to be detected by the MU  
radar ( $0.05^2 = 1/400$  of incident CRs)

$>10^{17}$ eV	several tens/day
$>10^{17.5}$ eV	several/day
$>10^{18}$ eV	several $10^{-1}$ /day
$>10^{18.5}$ eV	several $10^{-2}$ /day

## What is our target?

EAS axis  $\perp$  propagation direction



Shigaraki MU radar

Geometrical condition  
satisfied

$\sim 5\%$

Limitation for backscatter radar

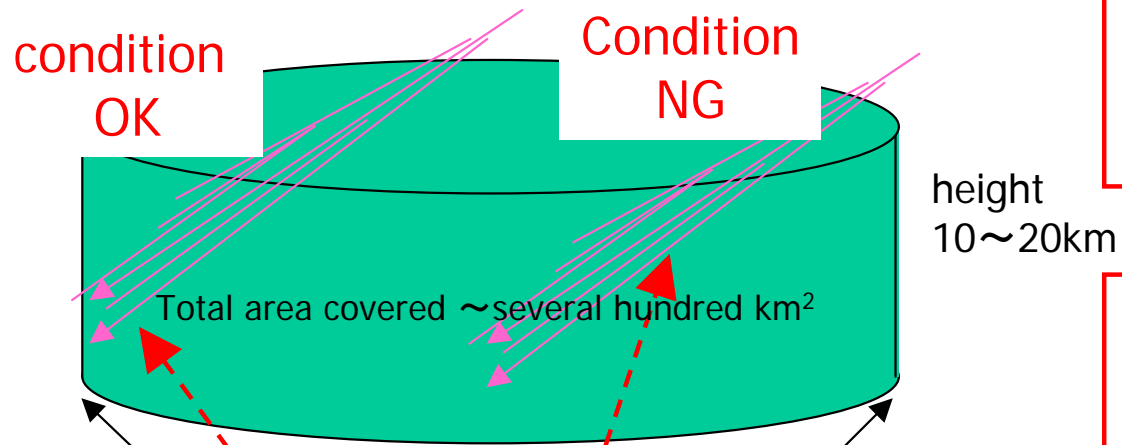
Limitation of pulse radar  
duty ratio is 5% or less

Number of CRs to be detected by the MU  
radar ( $0.05^2 = 1/400$  of incident CRs)

$>10^{17}$ eV	several tens/day
$>10^{17.5}$ eV	several/day
$>10^{18}$ eV	several $10^{-1}$ /day
$>10^{18.5}$ eV	several $10^{-2}$ /day

## What is our target?

EAS axis  $\perp$  propagation direction



Shigaraki MU radar

Geometrical condition  
satisfied

$\sim 5\%$

Limitation for backscatter radar

Limitation of pulse radar  
duty ratio is 5% or less

Number of CRs to be detected by the MU  
radar ( $0.05^2 = 1/400$  of incident CRs)

$>10^{17}$ eV	several tens/day
$>10^{17.5}$ eV	several/day
$>10^{18}$ eV	several $10^{-1}$ /day
$>10^{18.5}$ eV	several $10^{-2}$ /day

# レーダー観測の実際

## 送信パルスのパラメタ選択

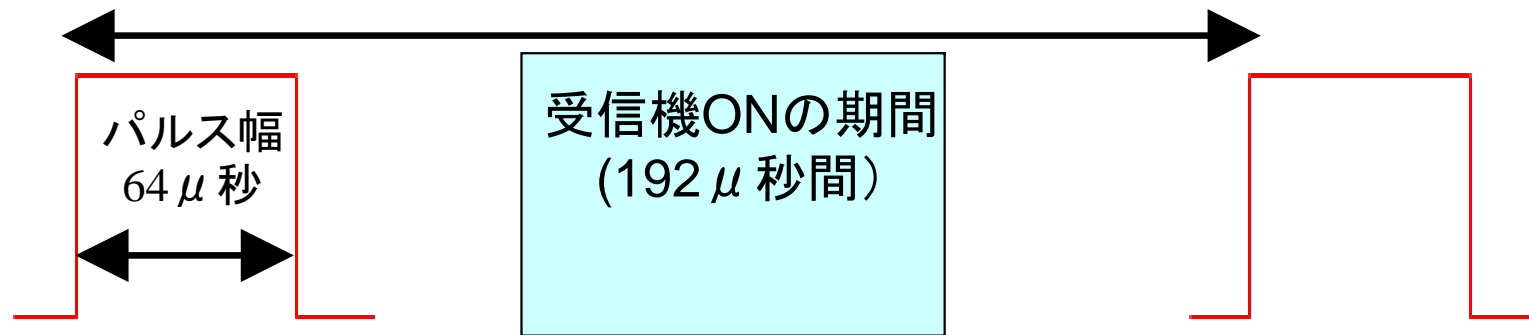
繰り返し周期(IPP)=4000  $\mu$  秒



# レーダー観測の実際

## 送信パルスのパラメタ選択

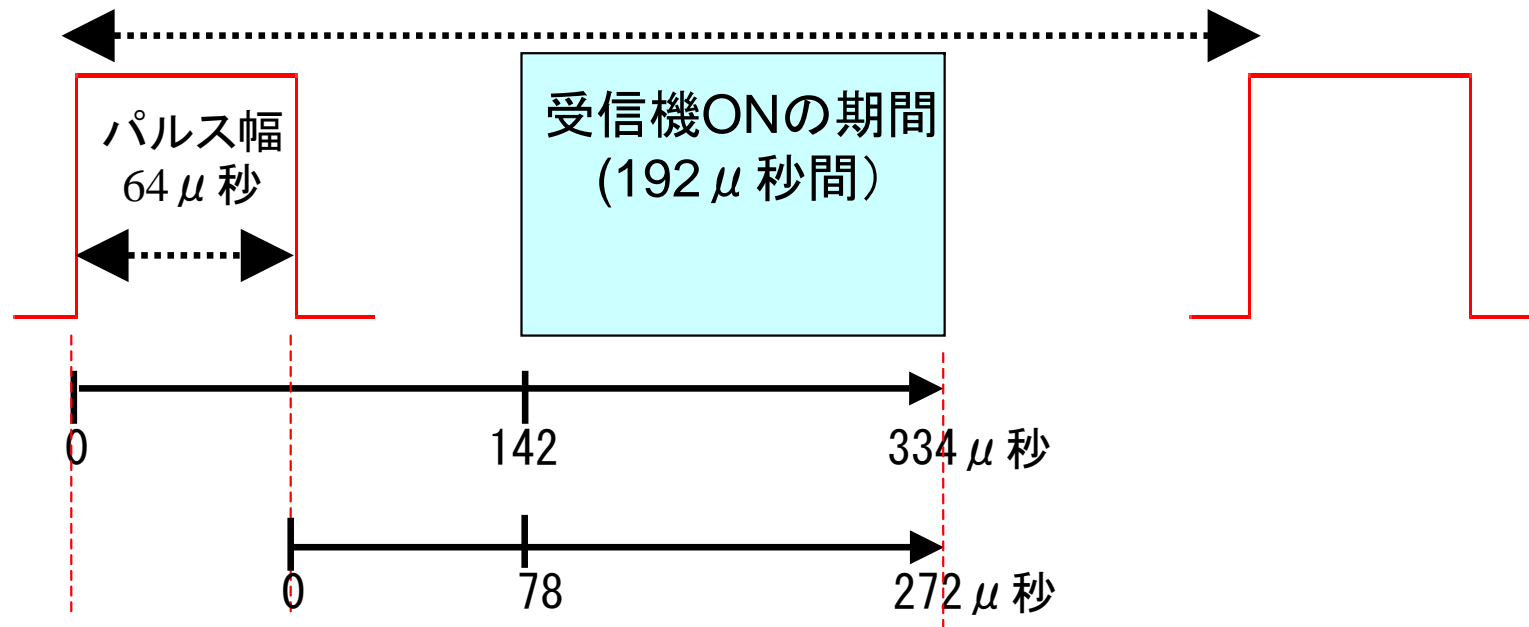
繰り返し周期(IPP)=4000  $\mu$  秒



# レーダー観測の実際

## 送信パルスのパラメタ選択

繰り返し周期(IPP)=4000  $\mu$  秒



受信機ON期間は

パルス先頭時刻後142-334  $\mu$  秒

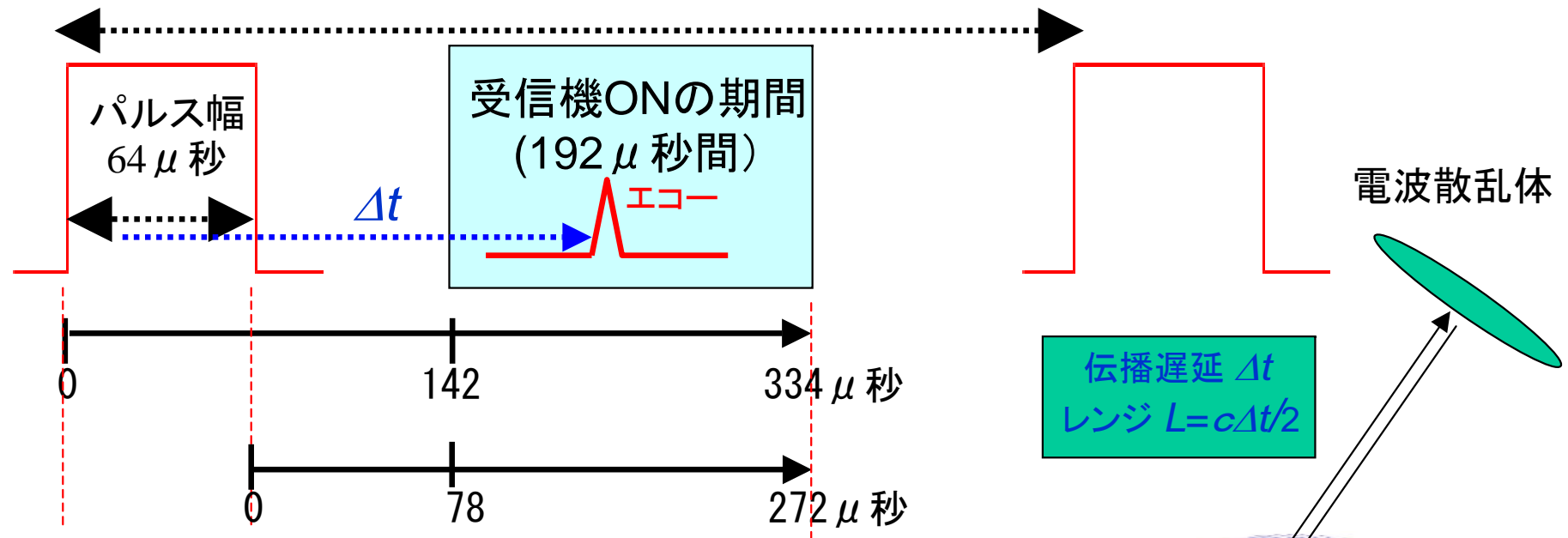
パルス終了時刻後 78-272  $\mu$  秒



# レーダー観測の実際

## 送信パルスのパラメタ選択

繰り返し周期(IPP)=4000  $\mu$  秒



受信機ON期間は

パルス先頭時刻後142-334  $\mu$  秒 (レンジ換算21.3-50.1km)

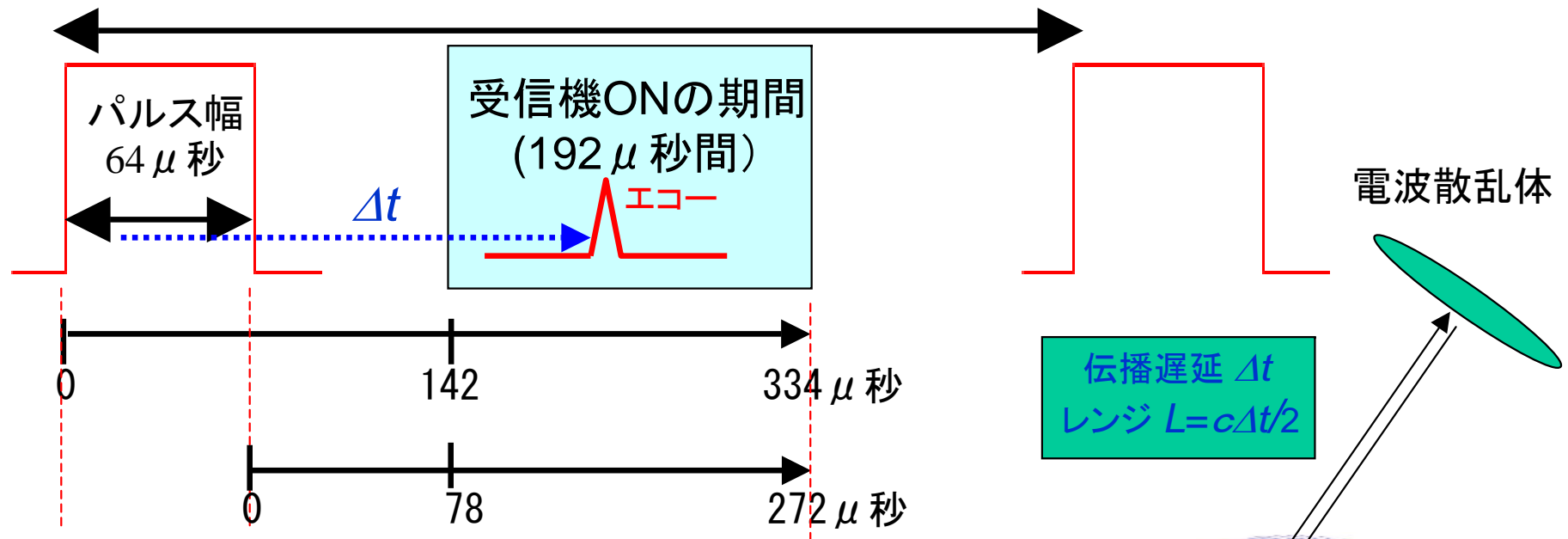
パルス終了時刻後 78-272  $\mu$  秒 (レンジ換算11.7-40.8km)



# レーダー観測の実際

## 送信パルスのパラメタ選択

繰り返し周期(IPP)=4000  $\mu$  秒



受信機ON期間は

パルス先頭時刻後142-334  $\mu$  秒 (レンジ換算21.3-50.1km)

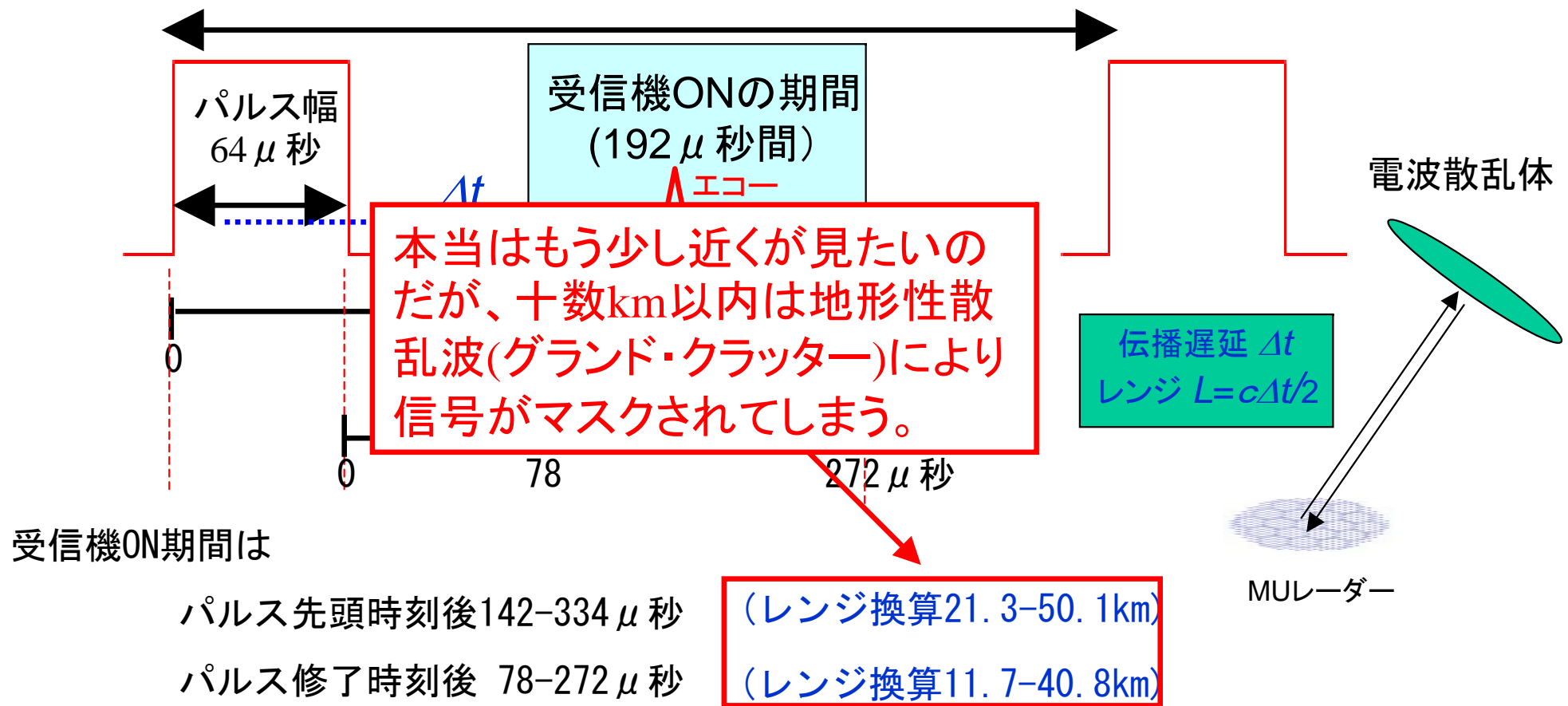
パルス終了時刻後 78-272  $\mu$  秒 (レンジ換算11.7-40.8km)

エコーの長さがパルス幅より短い場合、レンジ決定には10km程の不定性が避けられない  
(対応する高度決定の不定性は10 cos[天頂角] km)

# レーダー観測の実際

## 送信パルスのパラメタ選択

繰り返し周期(IPP)=4000  $\mu$  秒

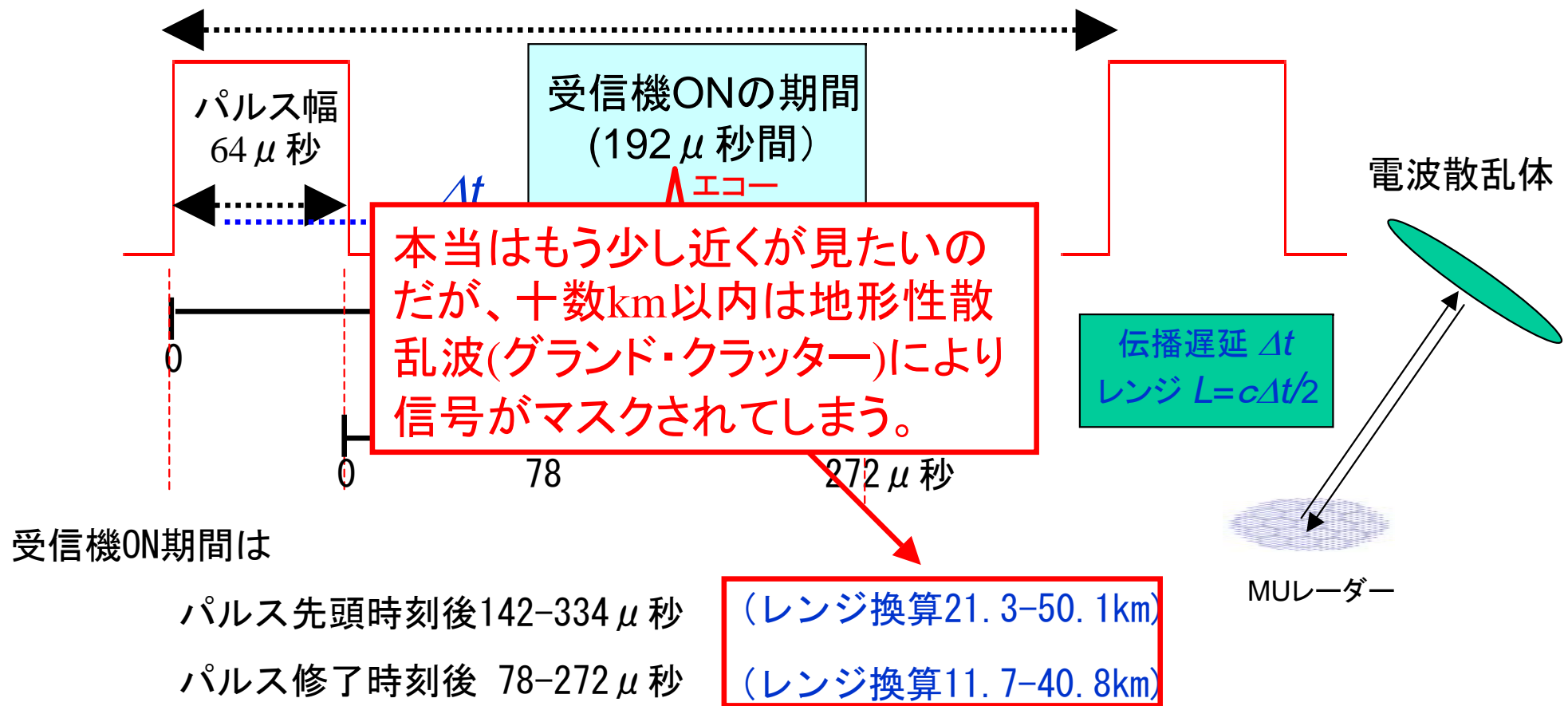


エコーの長さがパルス幅より短い場合、レンジ決定には10km程の不定性が避けられない  
(対応する高度決定の不定性は10  $\cos$ [天頂角] km)

# レーダー観測の実際

## 送信パルスのパラメタ選択

繰り返し周期(IPP)=4000  $\mu$  秒



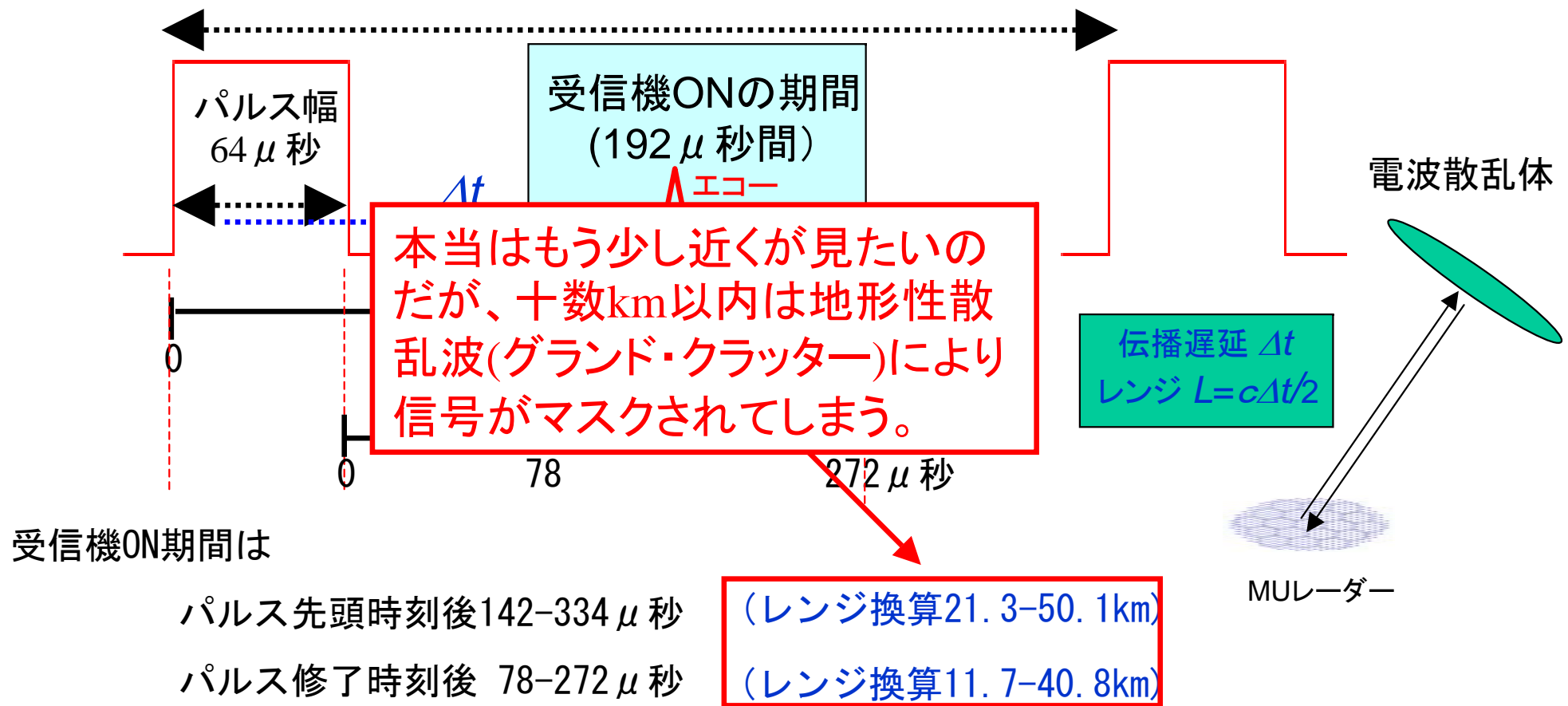
エコーの長さがパルス幅より短い場合、レンジ決定には10km程の不定性が避けられない  
(対応する高度決定の不定性は10  $\cos$ [天頂角] km)

受信時のサンプリング周波数500kHz (サンプリング周期2  $\mu$  秒=500kHzサンプリング)

# レーダー観測の実際

## 送信パルスのパラメタ選択

繰り返し周期(IPP)=4000  $\mu$  秒



エコーの長さがパルス幅より短い場合、レンジ決定には10km程の不定性が避けられない  
(対応する高度決定の不定性は10 cos[天頂角] km)

受信時の... リング周期2  $\mu$  秒 (=500kHzサンプリング)

ハード的には1  $\mu$  秒まで。現在はデータ蓄積処理に余裕をみて2  $\mu$  秒に設定。  
少し長すぎるので、今年のこれからの観測では1  $\mu$  秒に設定する予定

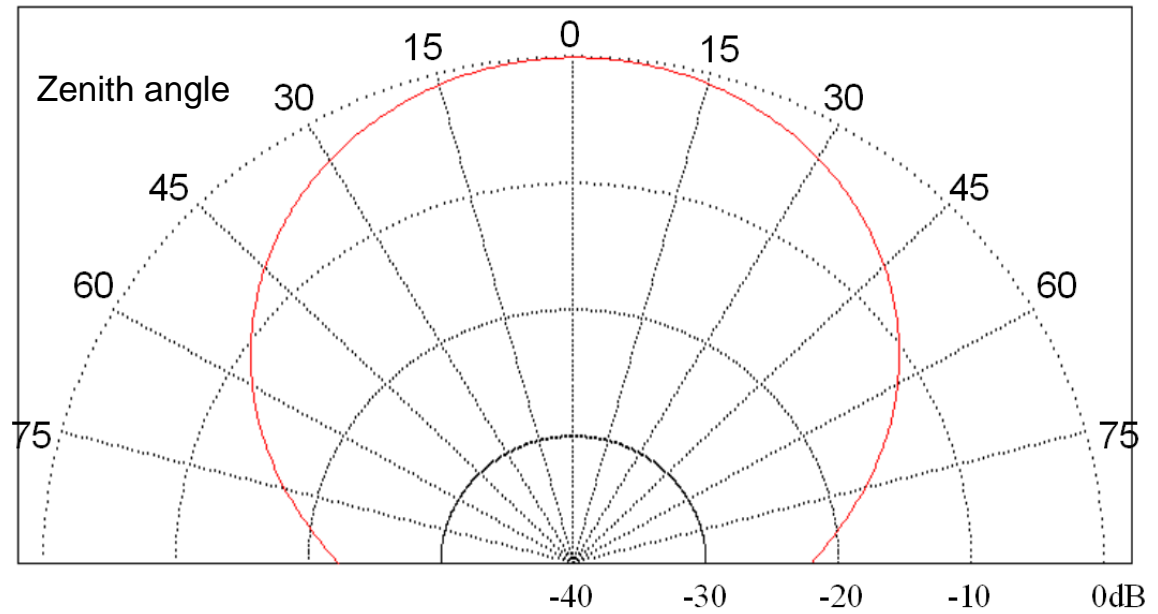


# 送信

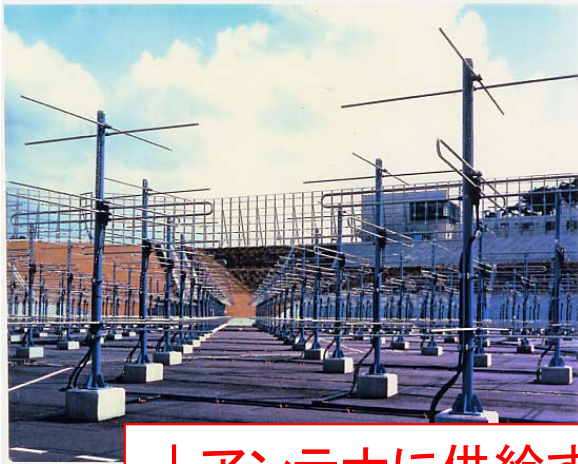


MU radar

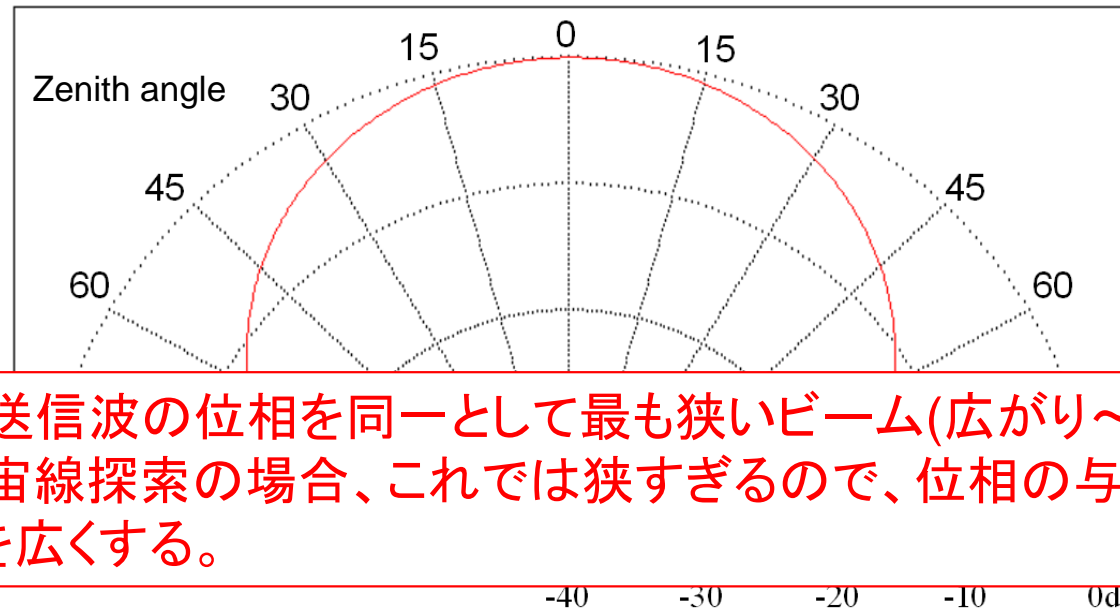
## Radiation pattern of a 3-element Yagi antenna



# 送信

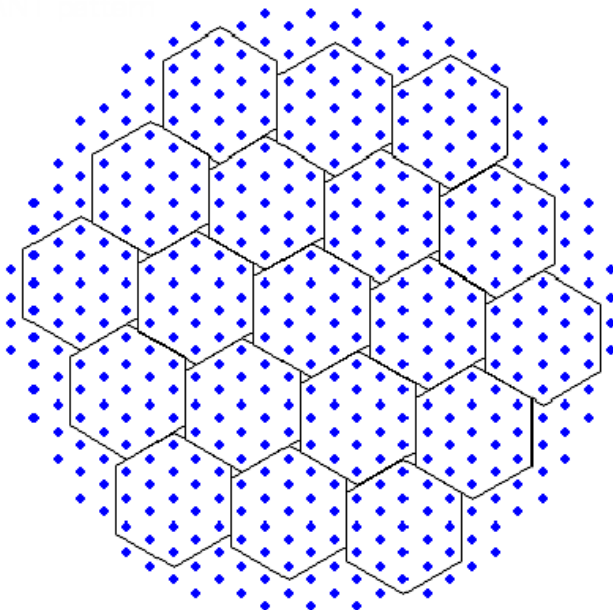


Radiation pattern of a 3-element Yagi antenna

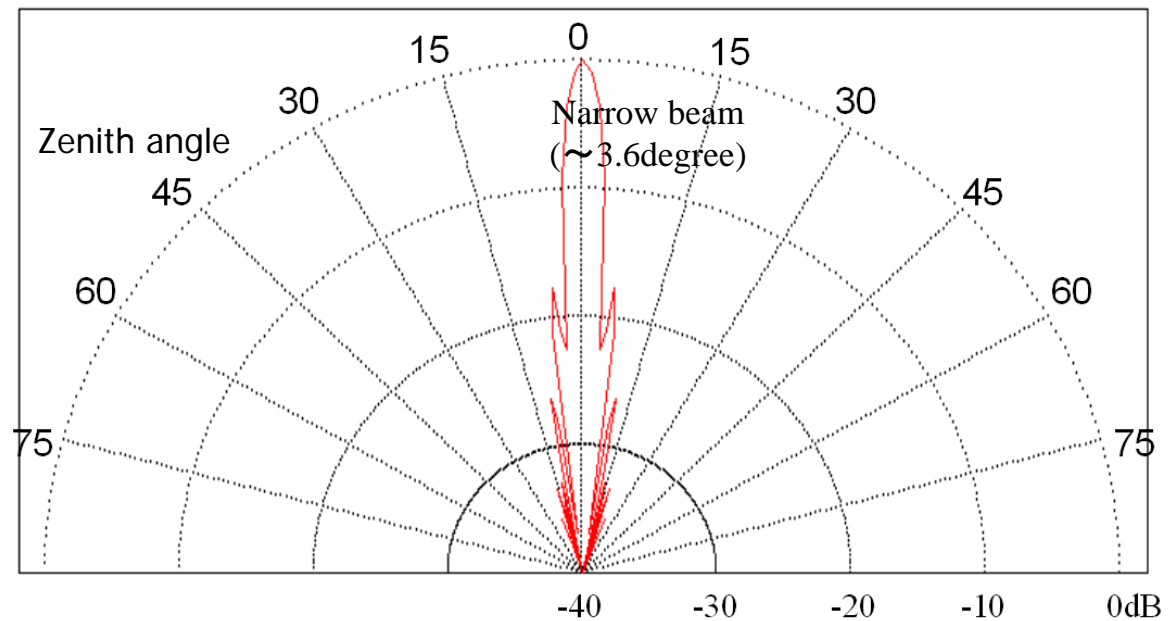


↓ アンテナに供給する送信波の位相を同一として最も狭いビーム(広がり $\sim \lambda/D$ )を構成した場合。宇宙線探索の場合、これでは狭すぎるので、位相の与え方を工夫して、ビームを広くする。

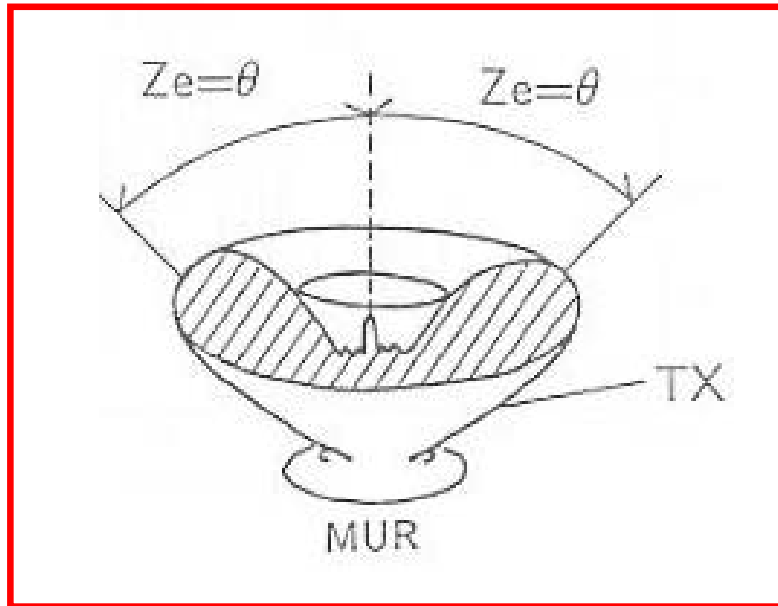
MU antenna map



Radiation pattern of combined 475 Yagi antennas



# 送信

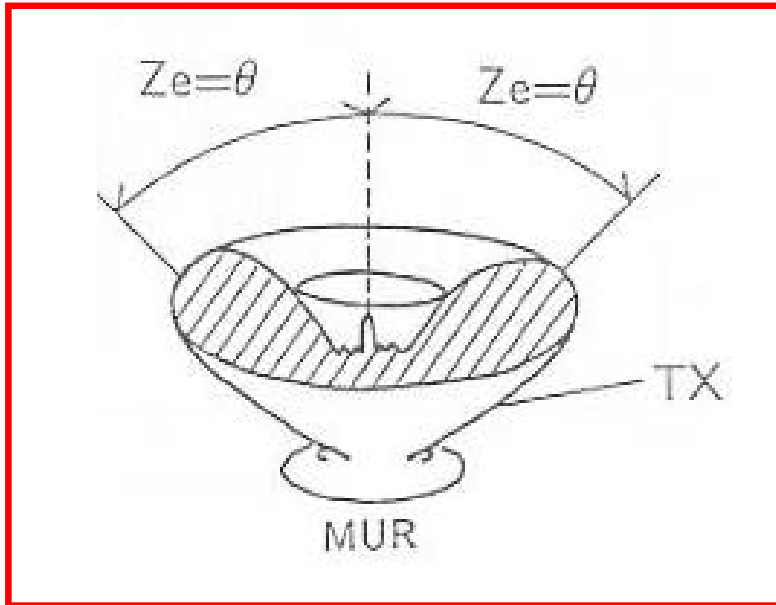


選択した広角送信ビームパターン

天頂角45度程度までカバーするよう調整

(少し広すぎた。今後は10度ほどに狭めるよう検討中)

## 送信



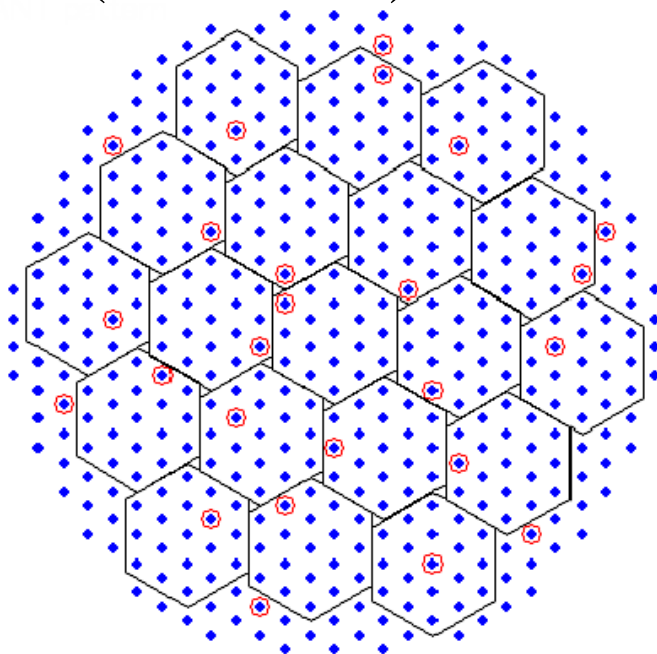
選択した広角送信ビームパターン

天頂角45度程度までカバーするよう調整

(少し広すぎた。今後は10度ほどに狭めるよう検討中)

送信・受信に対するアンテナの位相パラメタセットは独立であり、それぞれに対し任意のビームパターンが設定可能である。

## 受信(方向探知)



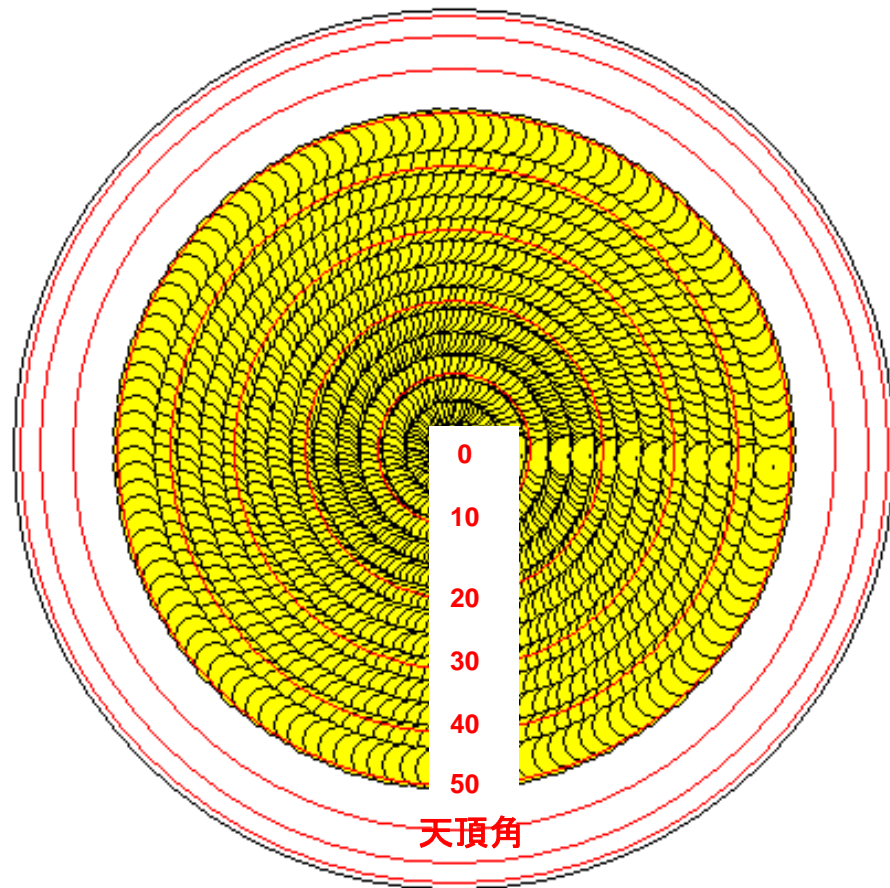
独立な信号記録は25系統なので、それに合うようアンテナを25本選ぶ。

(広角送信ビームパターンに合わせた。感度を犠牲にして、視野を広げる選択。)



方向探知: 受信データ\*の事後処理による

→電波干渉計の常套手段 Aperture Synthesis手法による全天電波輝度マップ作成



●は受信ビームのメインローブの大きさを示す。

\*25素子干渉計処理 (20秒間で約100MB=1時間で約18GBのデータが発生。一回の観測で100GB-200GB程度となる。)

天球上の天頂角 $\theta=0-50^\circ$ 、方位角 $\phi=0-360^\circ$ の範囲を1423個に分割し、全領域の電波輝度のそれぞれの時間変化を $2\mu$ 秒毎に計算し、ピークを探す。

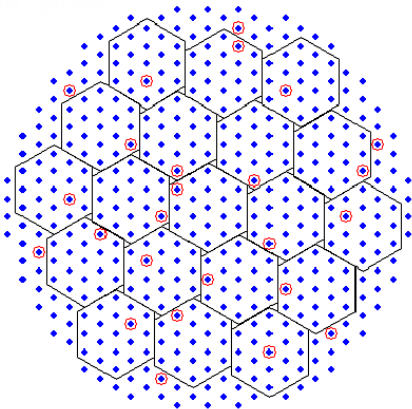
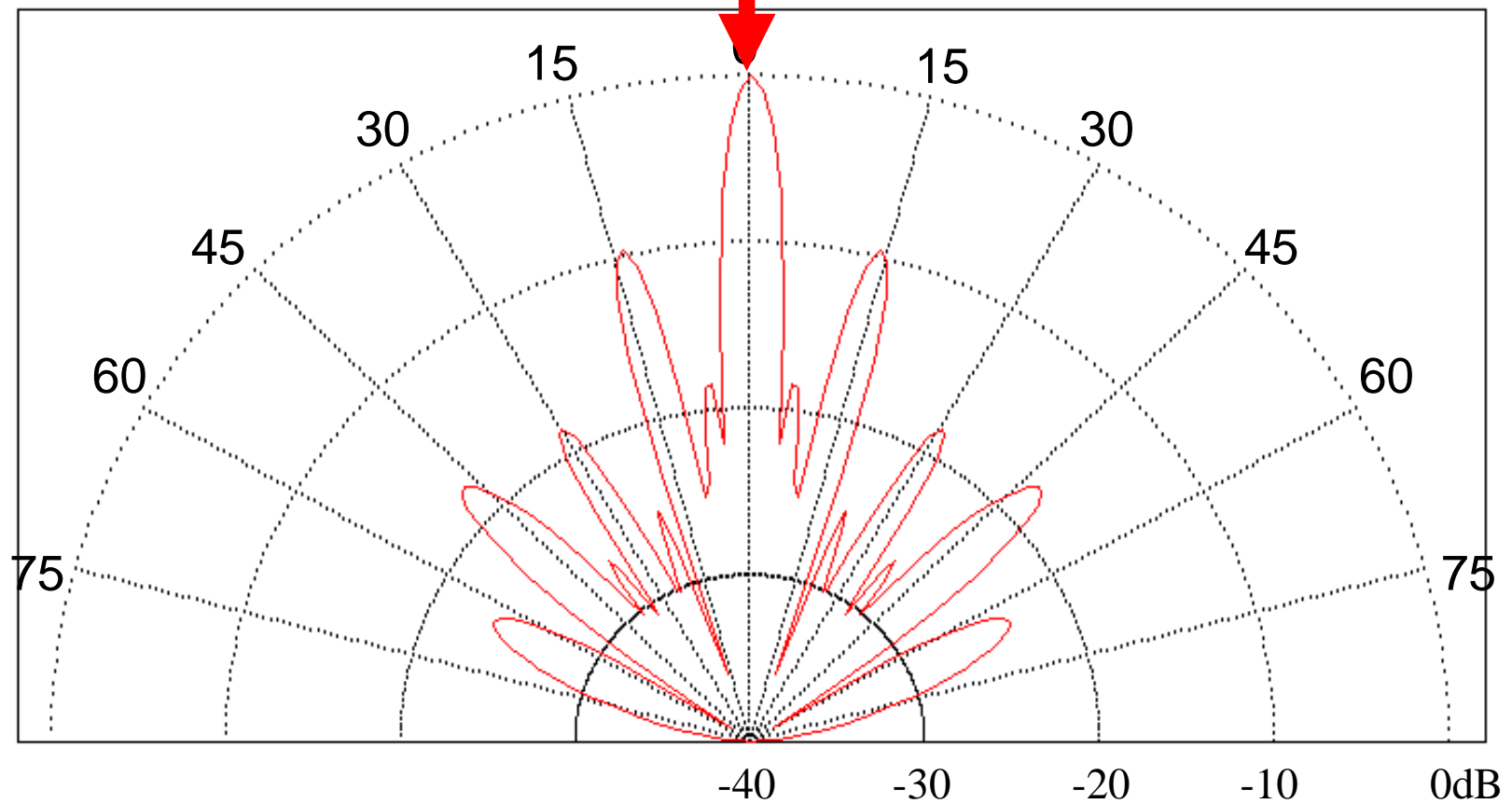
$$C(\Delta r_{ij}) \rightarrow \sum_{ij} C(\Delta r_{ij}) \exp(-ik\Delta r_{ij})$$

時間のかかる処理(FFTが使えない)。

(Core2Duo 3.16GHzのPCで20秒間のデータの処理に2時間半)

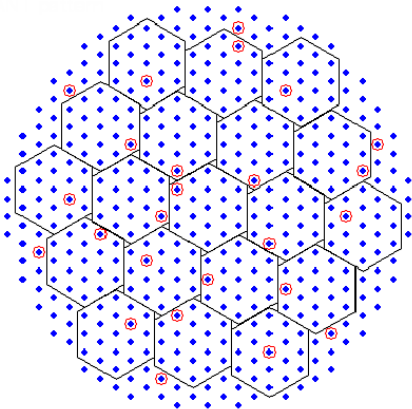
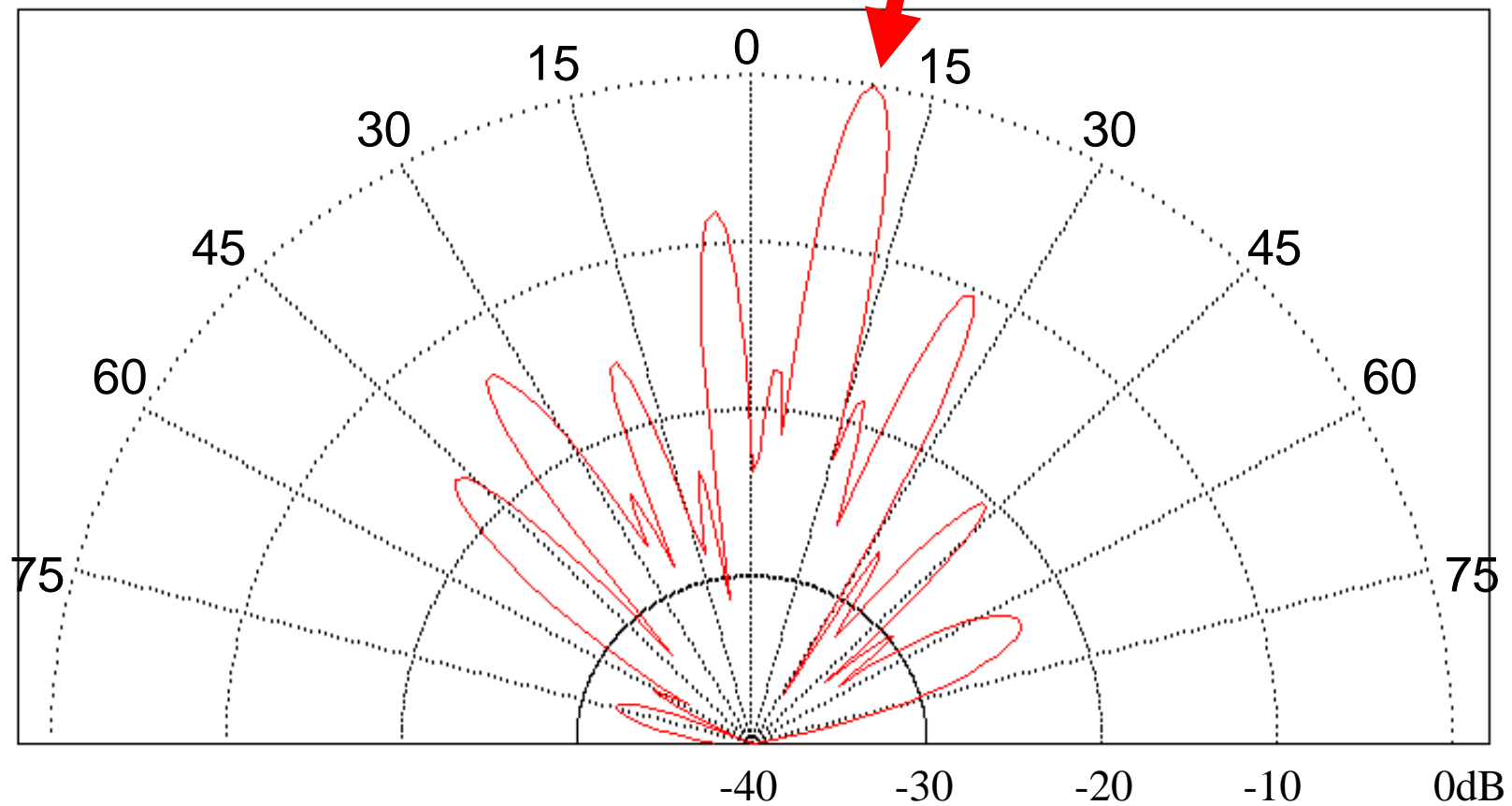
→GPGPUによる高速化の試み(～数百倍)

## 25 antenna Combination (pointing toward the zenith)



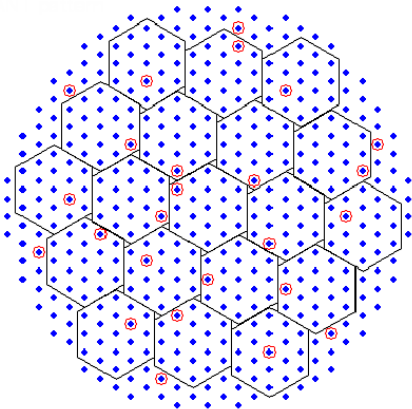
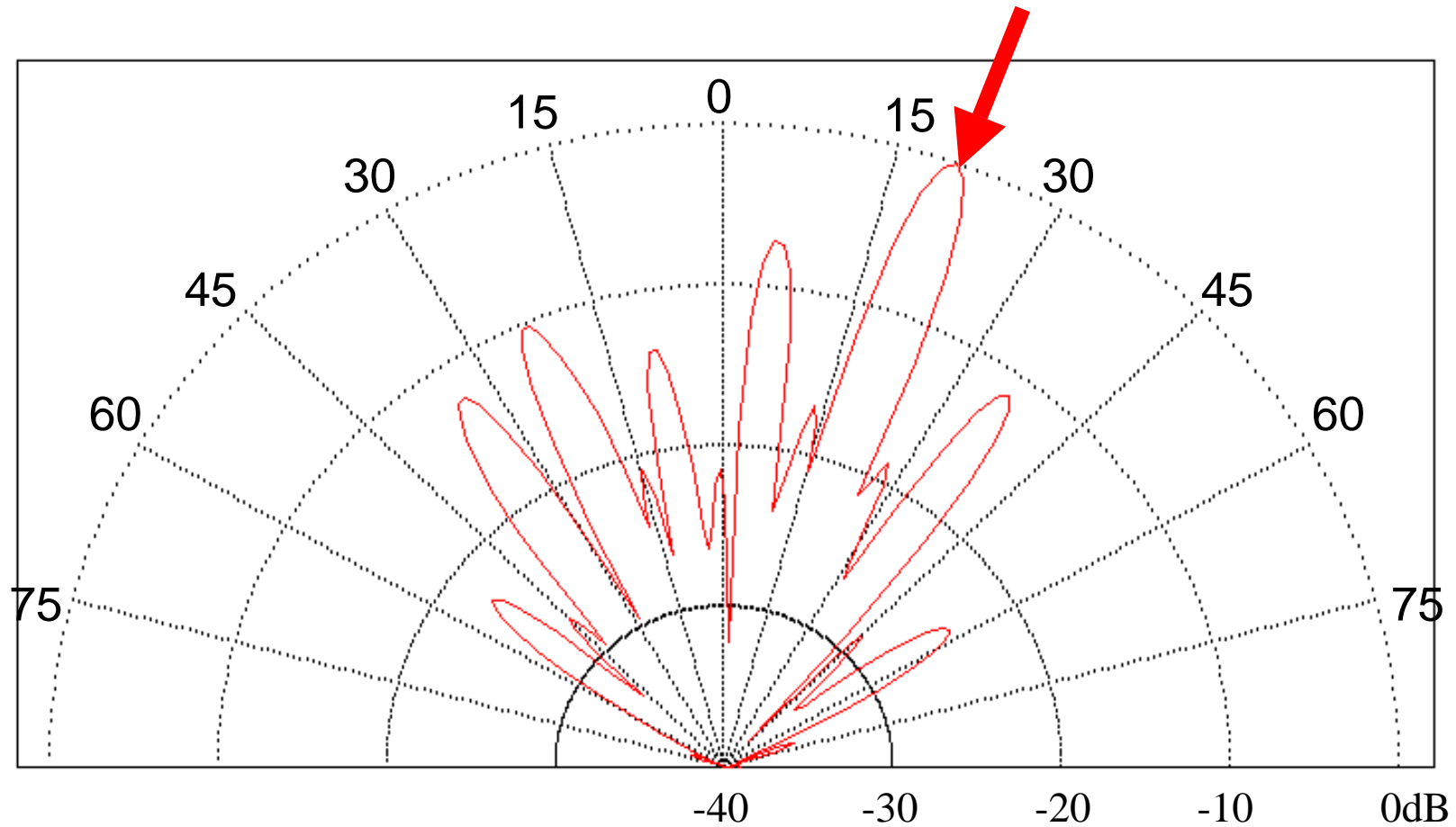
ただし、25素子干渉計によるside lobe suppressionは精々  
10dBほどである

## 25 antenna Combination (pointing toward zenith angle=10°)



ただし、25素子干渉計によるside lobe suppressionは精々  
10dBほどである

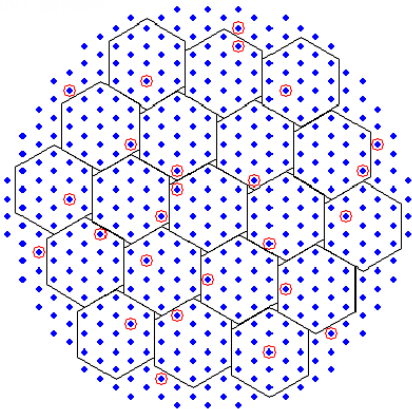
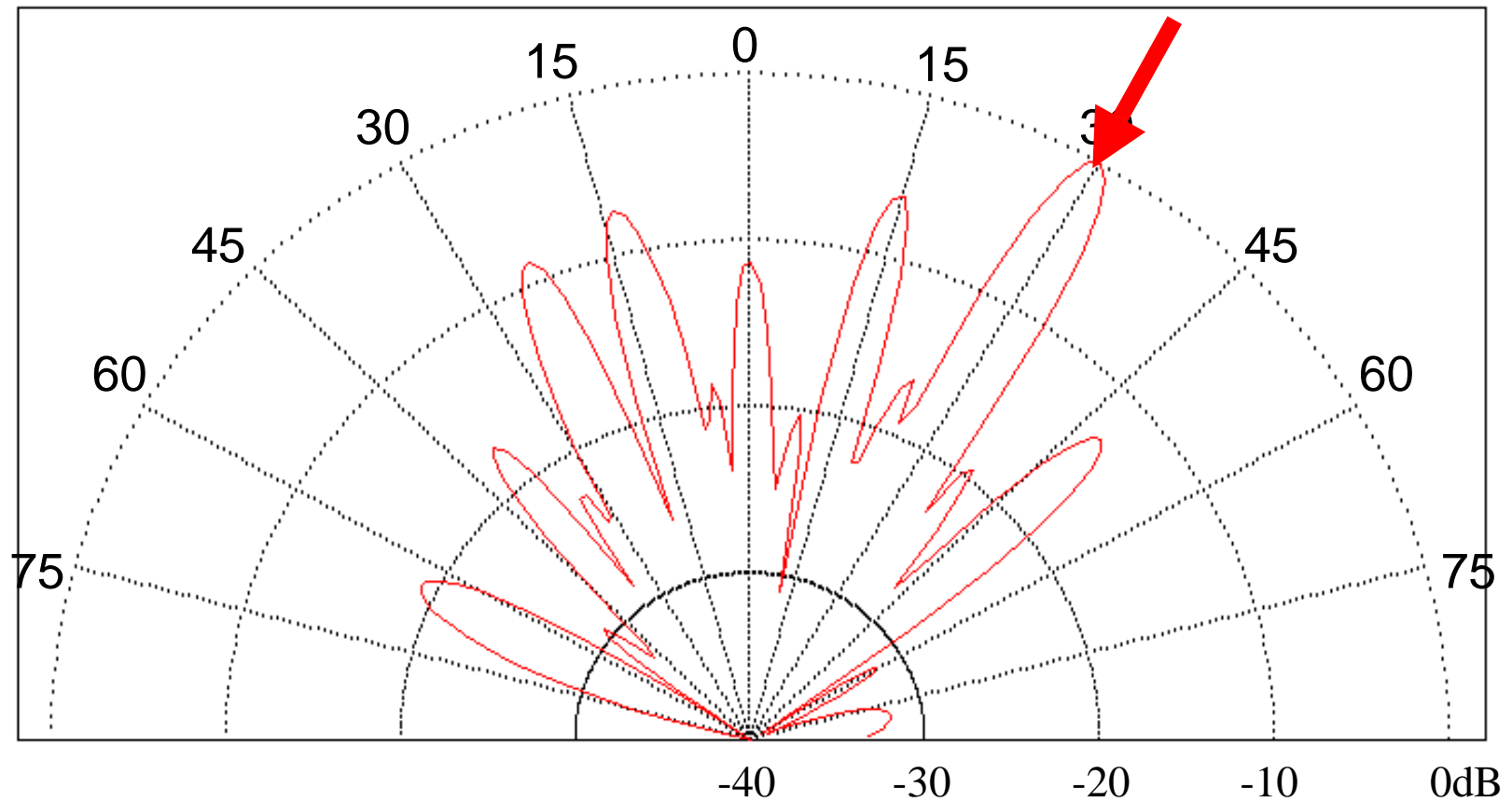
## 25 antenna Combination (pointing toward zenith angle=20°)



ただし、25素子干渉計によるside lobe suppressionは精々  
10dBほどである

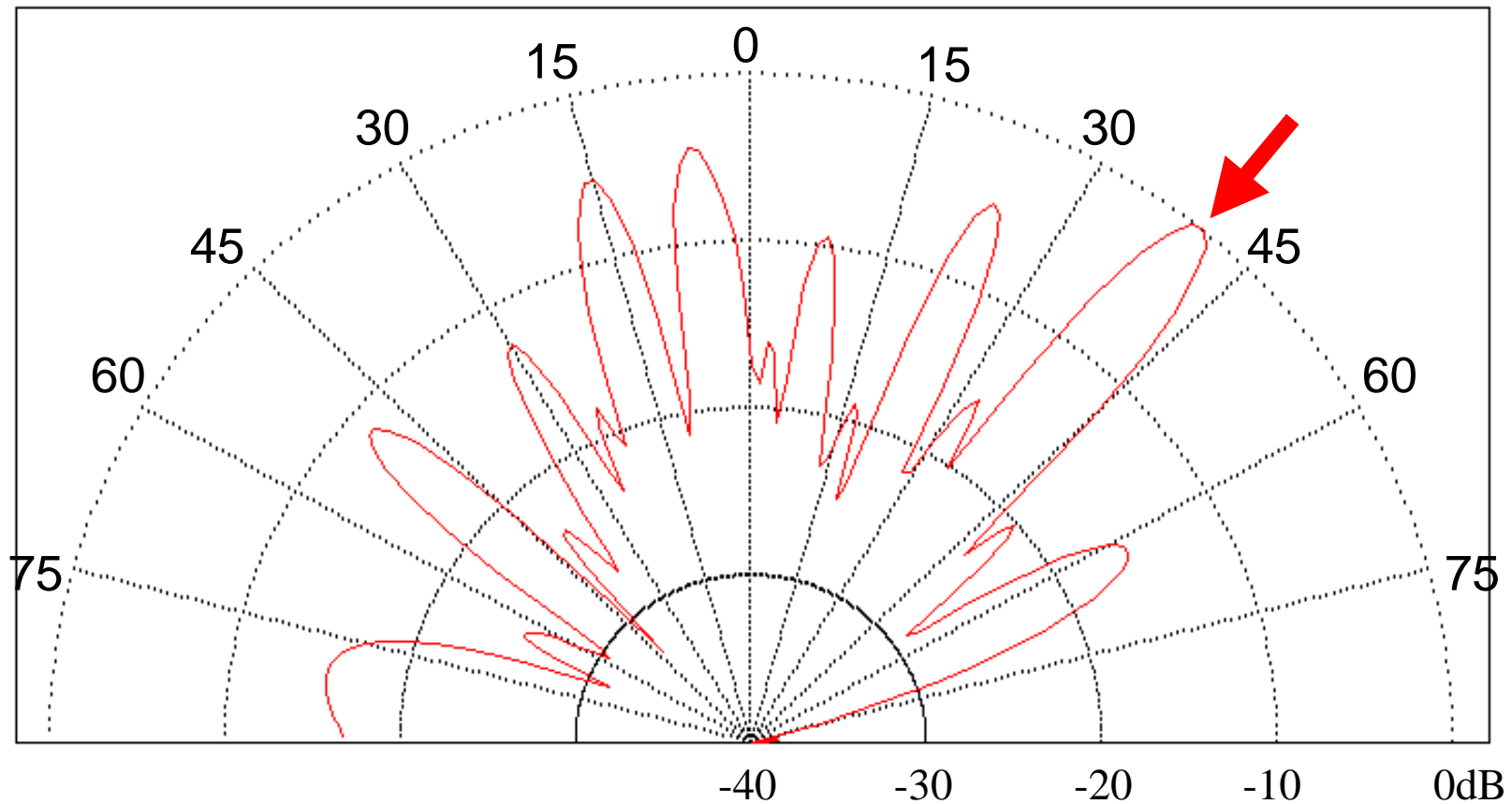


## 25 antenna Combination (pointing toward zenith angle=30°)



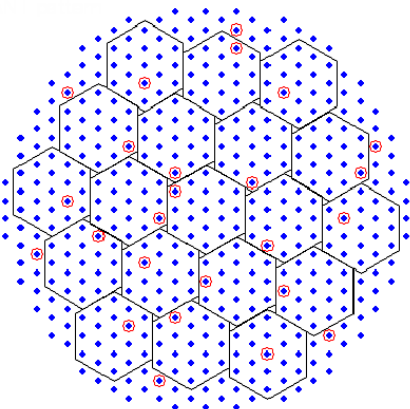
ただし、25素子干渉計によるside lobe suppressionは精々  
10dBほどである

## 25 antenna Combination (pointing toward zenith angle=40°)



天頂角40度になるとside lobe suppressionが悪い  
(設計上30度までとされている)

ただし、25素子干渉計によるside lobe suppressionは精々  
10dBほどである



# 目次

1. Introduction

2. 宇宙線のさまざまな電波観測手段

3. レーダー法の原理

4. 京大信楽MUレーダー概要

5. 宇宙線エコー候補

その同定と強度推定

6. レーダー法と制動輻射受信法

付録: レーダー法学生実習

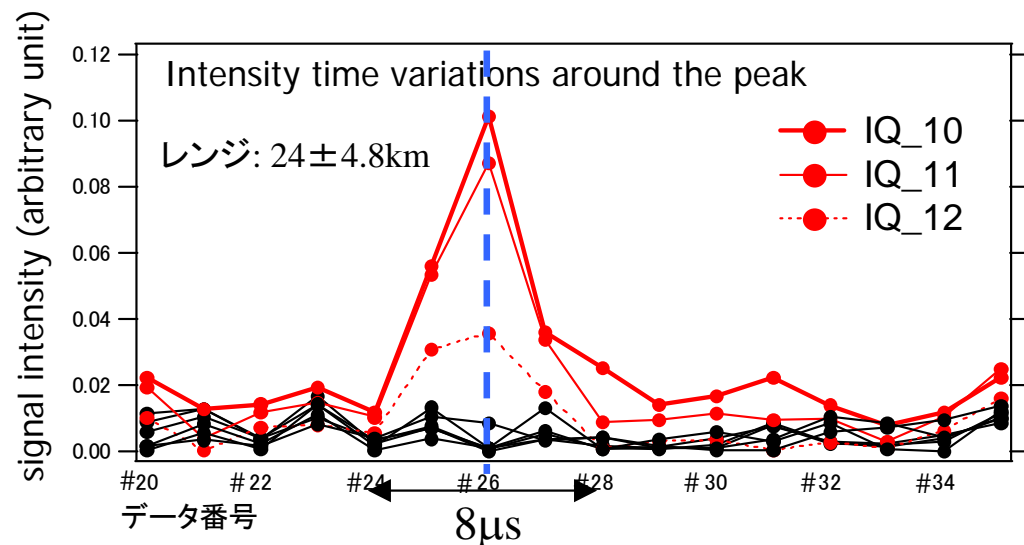
(駒場 全学体験セミナー)

done



# 見いだした宇宙線エコー候補 (一番S/Nのよい例)

2008/12/3 02:32JST

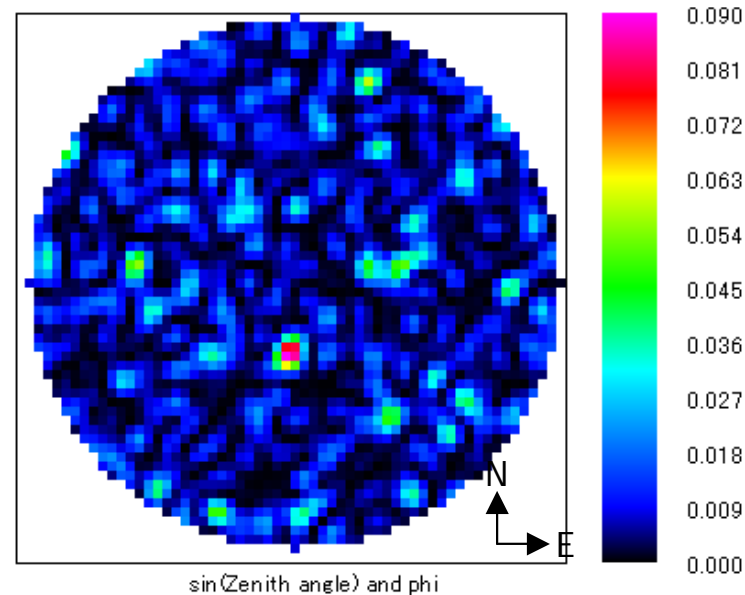


↑ 右の天球輝度マップの最大輝度点とその周り数点(6度離れた点)での輝度の時間変化

エコーのrange= $24.8 \pm 4.8\text{km}$

N  
E

干渉計による合成像 (天頂角50度以内)

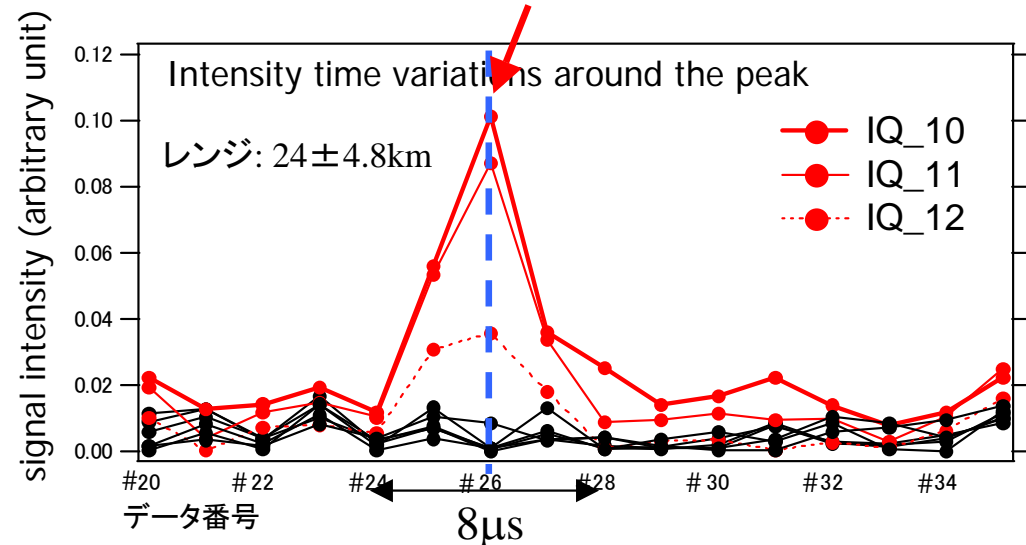


↑ 干渉計データ処理による天球輝度マップ (sin(天頂角), 方位角)

## 見いだした宇宙線エコー候補 (一番S/Nのよい例)

2008/12/3 02:32JST

peak intensity  $\sim 0.10$

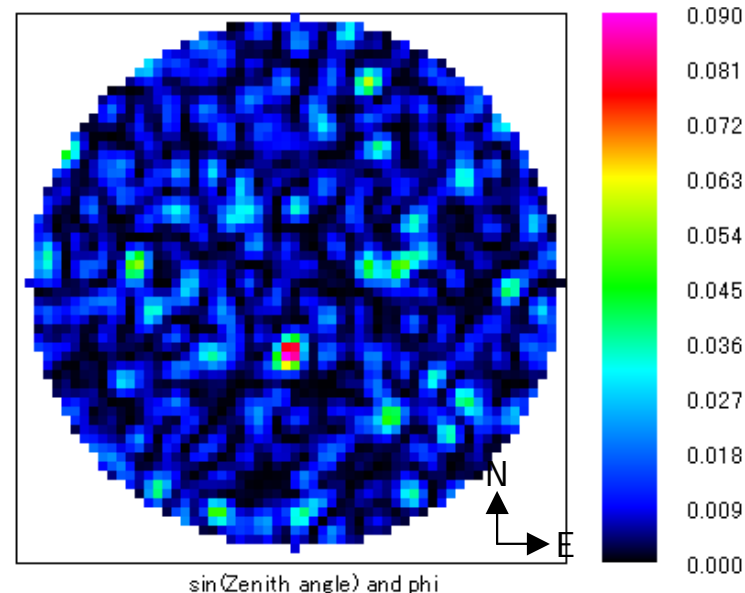


↑ 右の天球輝度マップの最大輝度点と  
その周り数点(6度離れた点)での  
輝度の時間変化

エコーのrange= $24.8 \pm 4.8\text{km}$

N  
E

干渉計による合成像 (天頂角50度以内)



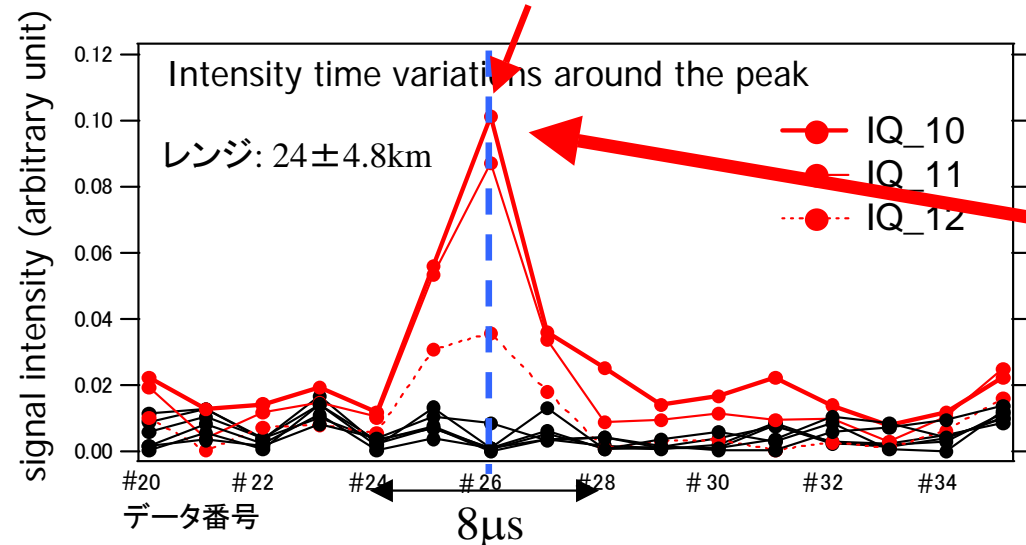
↑ 干渉計データ処理による  
天球輝度マップ  
(sin(天頂角), 方位角)



## 見いだした宇宙線エコー候補 (一番S/Nのよい例)

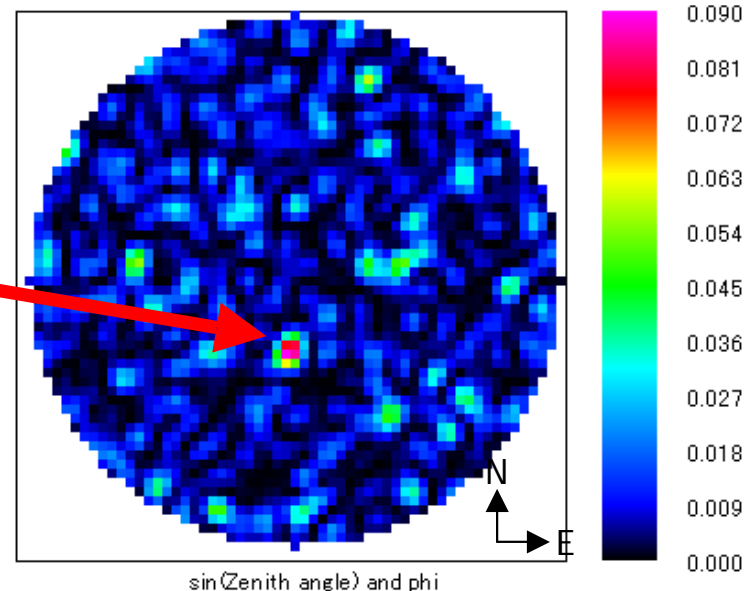
2008/12/3 02:32JST

peak intensity  $\sim 0.10$



N  
E

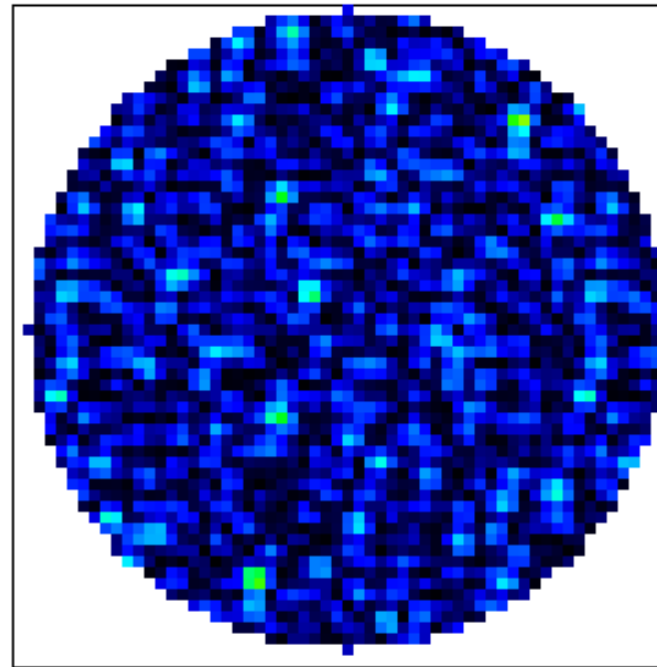
干渉計による合成像 (天頂角50度以内)



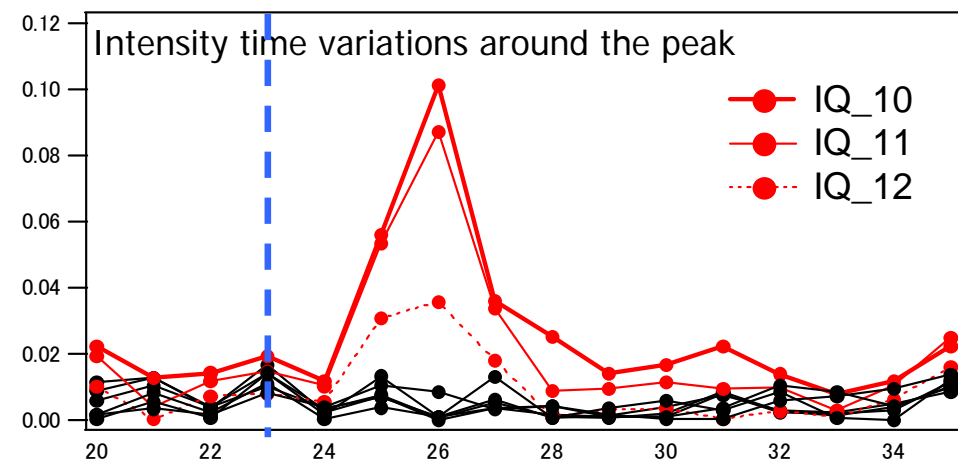
↑ 右の天球輝度マップの最大輝度点と  
その周り数点(6度離れた点)での  
輝度の時間変化

↑ 干渉計データ処理による  
天球輝度マップ  
(sin(天頂角), 方位角)

エコーのrange= $24.8 \pm 4.8\text{km}$

$6\ \mu$  sec before the peak

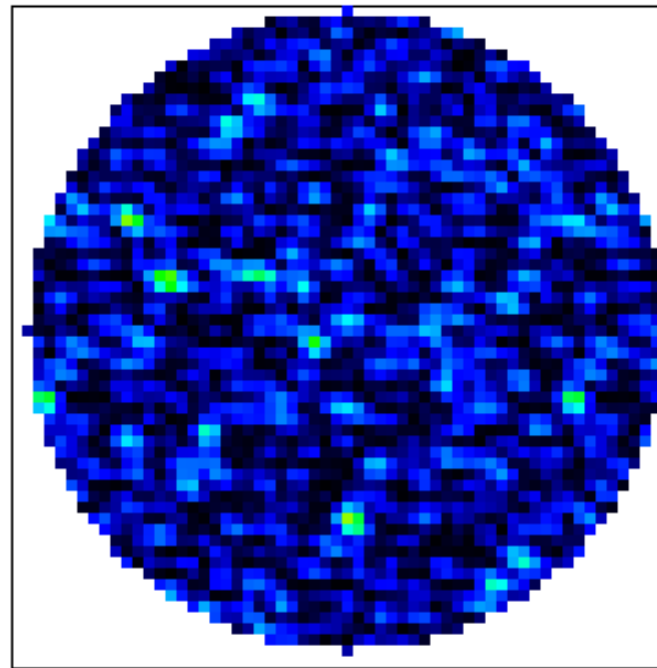
synthesized map

(天頂角90度まで、  
探索領域の外も描画)range= $24.8 \pm 4.8$ km

12/3 02:31:53.6

Time variation

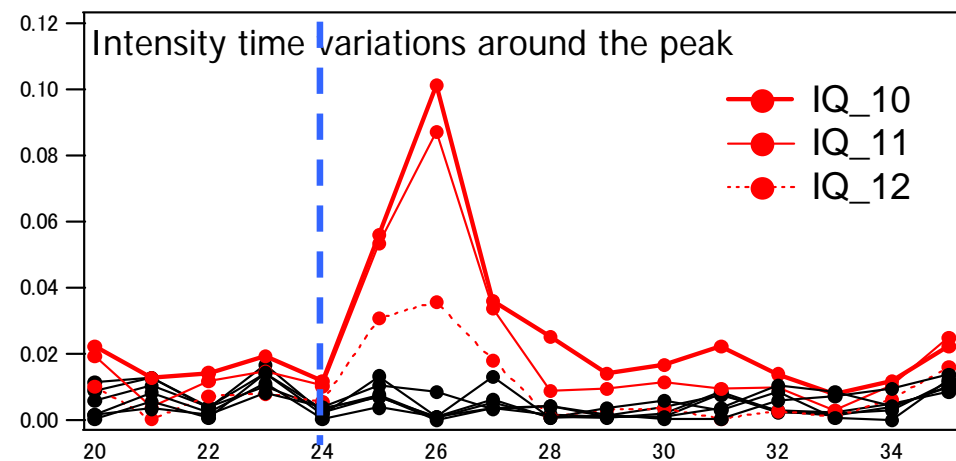
4  $\mu$  sec before the peak



synthesized map

(天頂角90度まで、  
探索領域の外も描画)

sin(Zenith angle) and phi

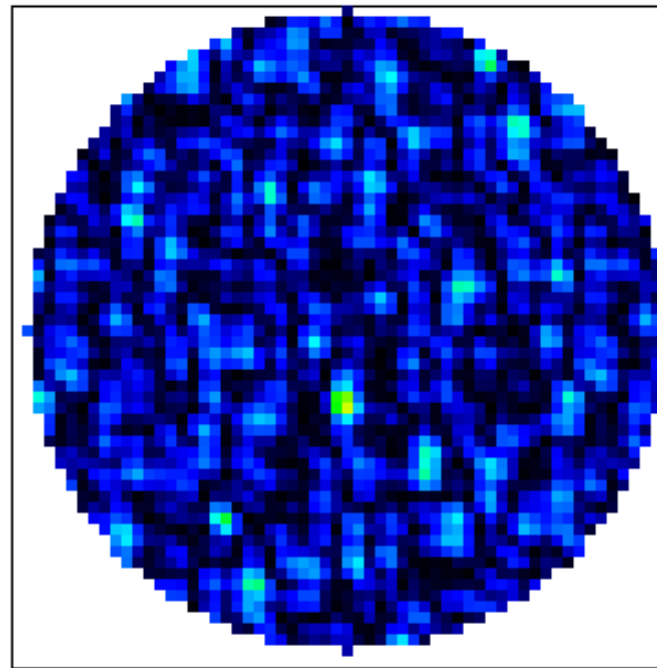


range= $24.8 \pm 4.8$ km

12/3 02:31:53.6

Time variation

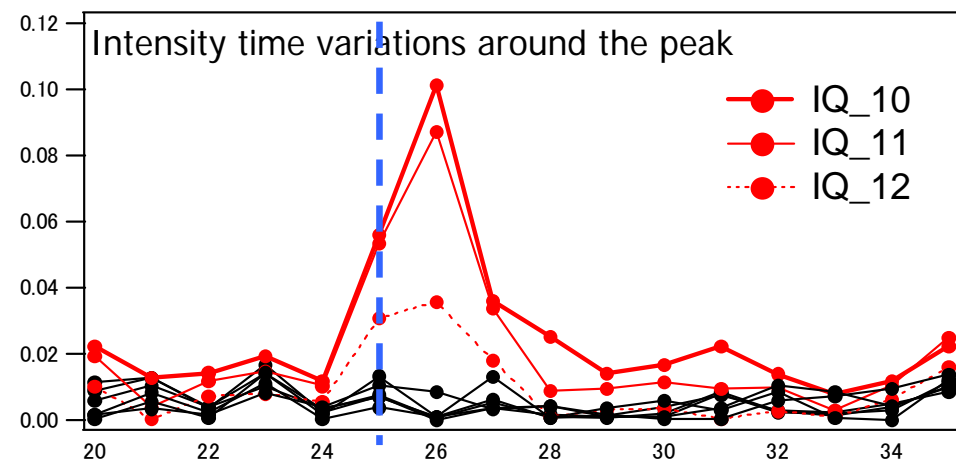
$2\mu$  sec before the peak



synthesized map

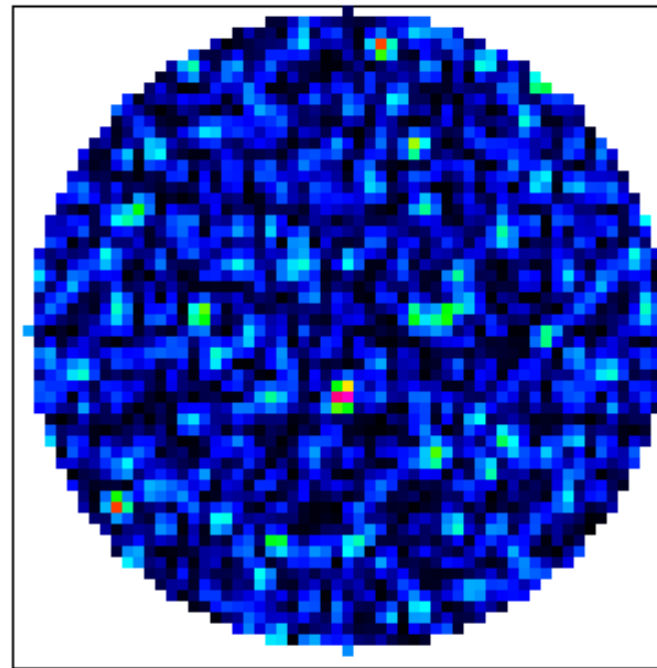
(天頂角90度まで、  
探索領域の外も描画)

sin(Zenith angle) and phi

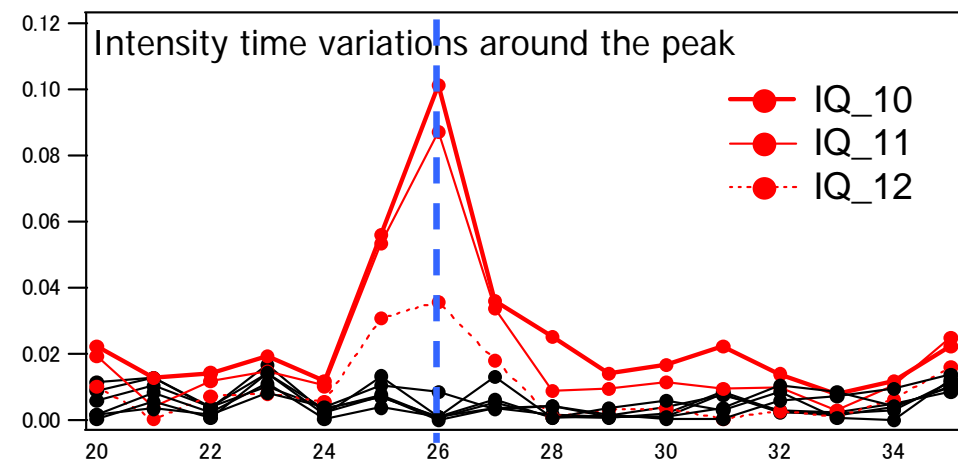


range= $24.8 \pm 4.8$ km

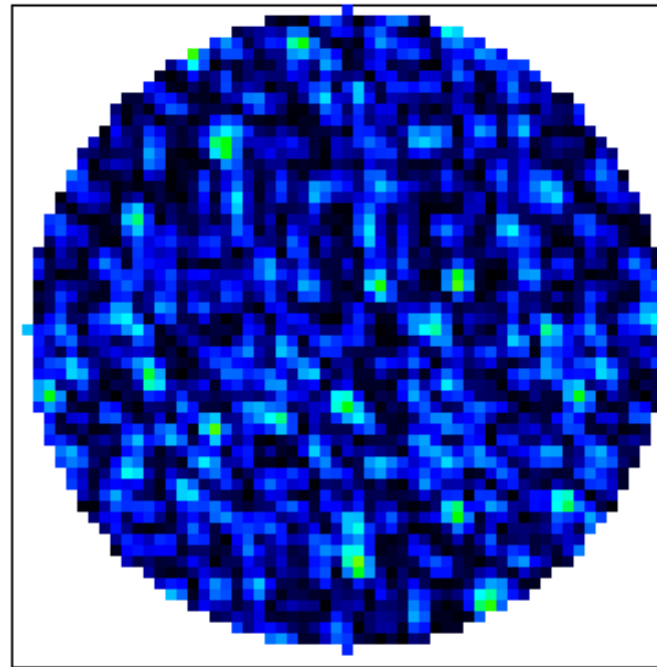
Just at the peak



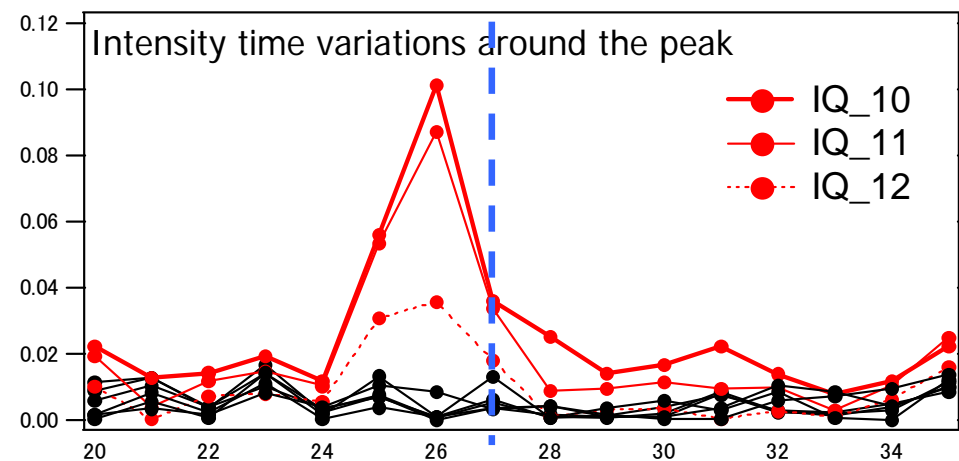
synthesized map

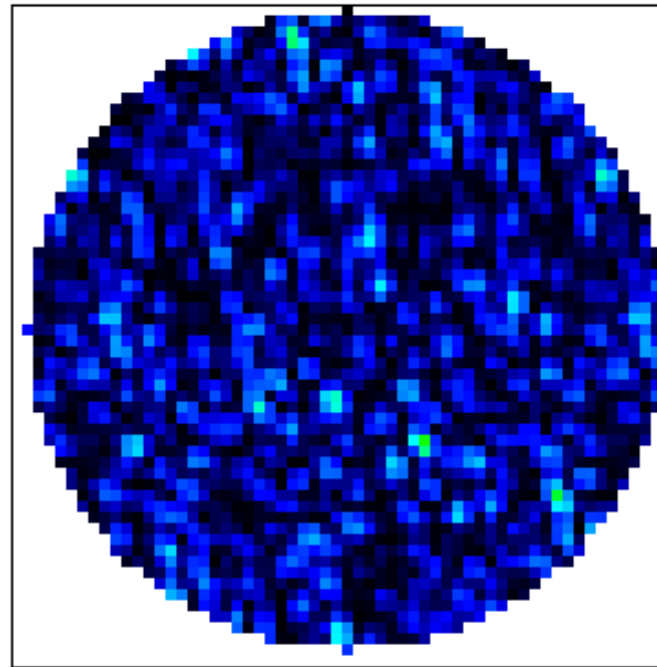
(天頂角90度まで、  
探索領域の外も描画)range= $24.8 \pm 4.8$ km



$2\ \mu$  sec after the peak

synthesized map

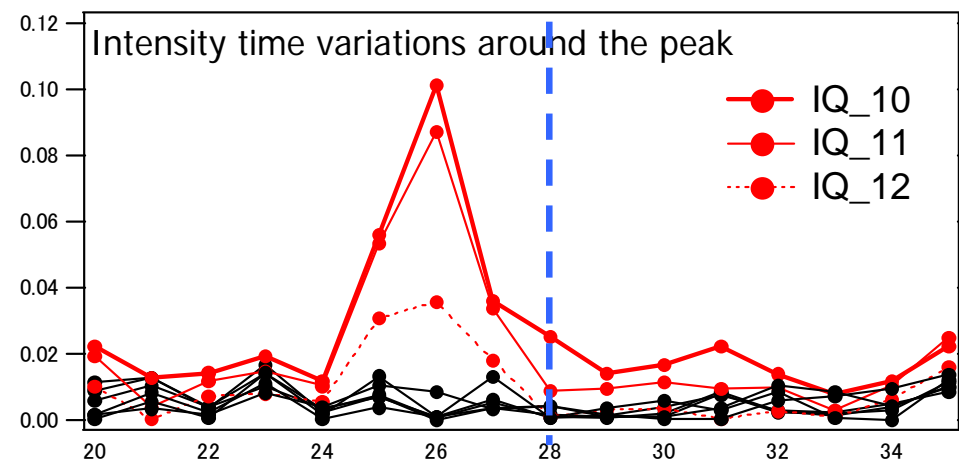
(天頂角90度まで、  
探索領域の外も描画)range= $24.8 \pm 4.8$ km

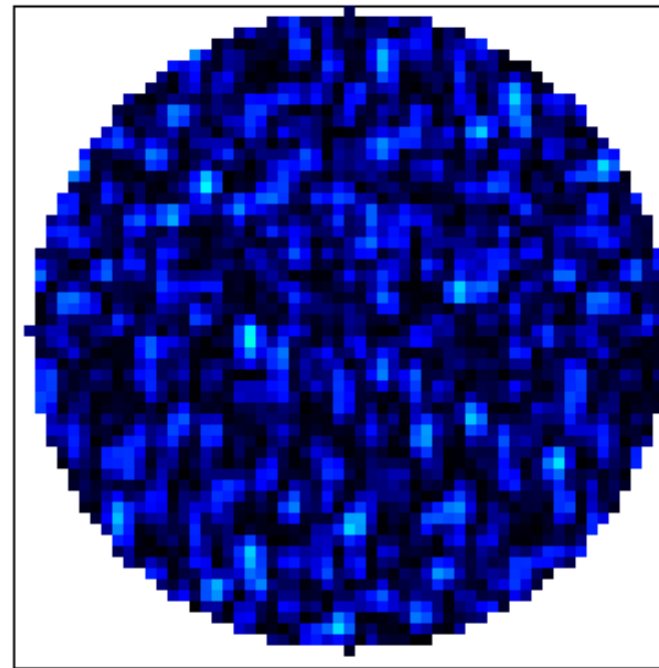
$4\ \mu$  sec after the peak

synthesized map

(天頂角90度まで、  
探索領域の外も描画)

sin(Zenith angle) and phi

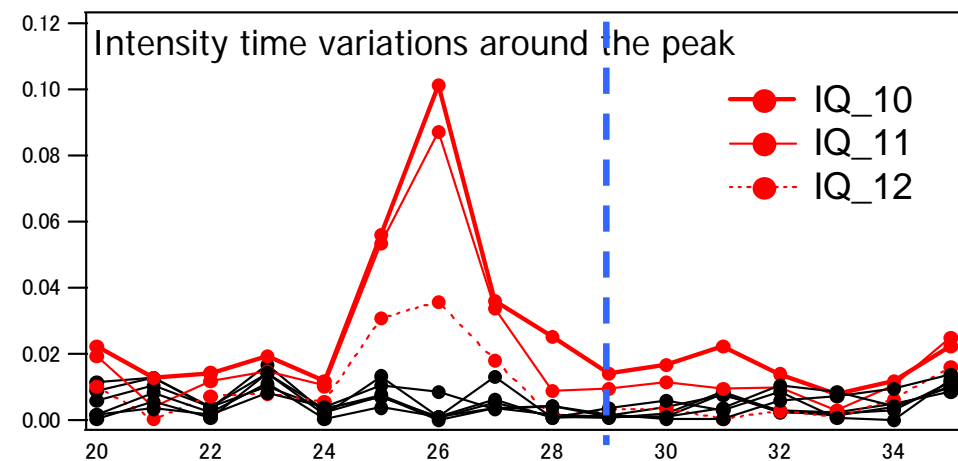
range= $24.8 \pm 4.8$ km

$6\ \mu$  sec after the peak

synthesized map

(天頂角90度まで、  
探索領域の外も描画)

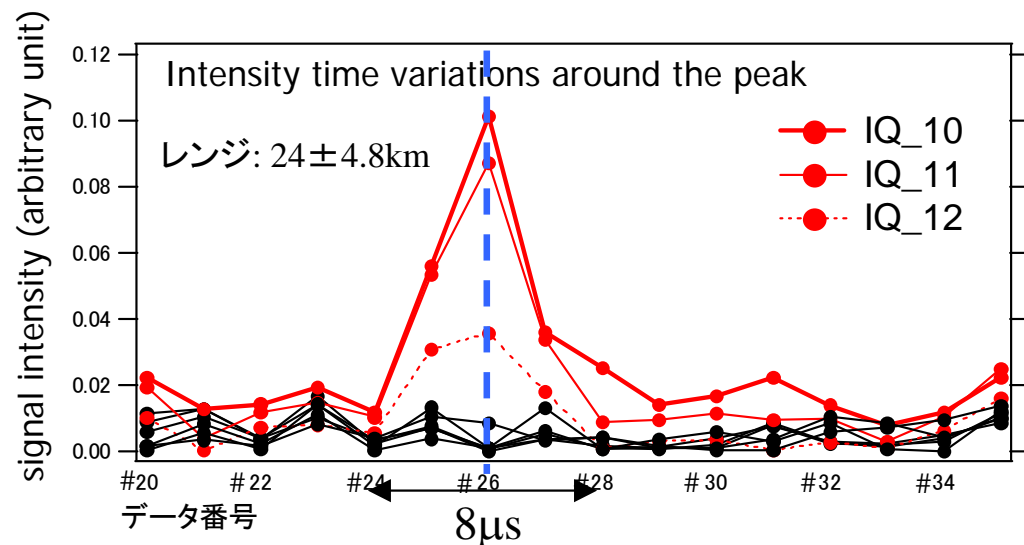
sin(Zenith angle) and phi

range= $24.8 \pm 4.8$ km



# 見いだした宇宙線エコー候補 (一番S/Nのよい例)

2008/12/3 02:32JST

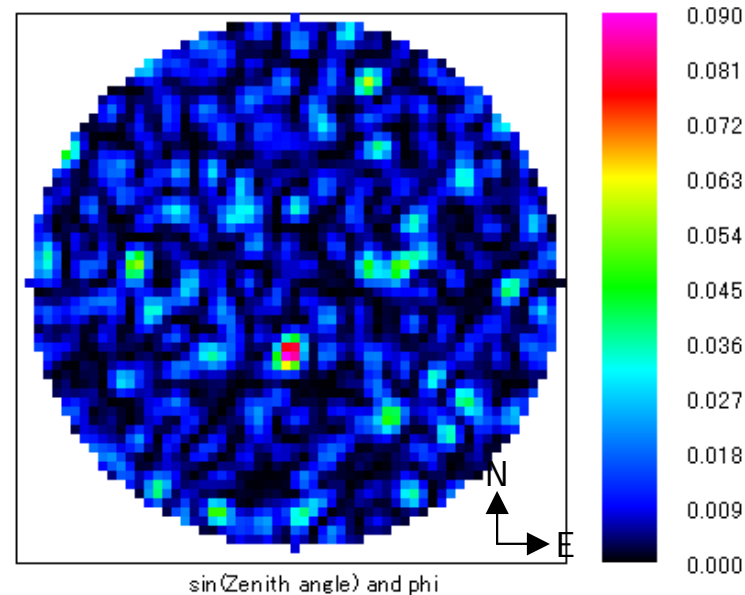


↑ 右の天球輝度マップの最大輝度点とその周り数点(6度離れた点)での輝度の時間変化

エコーのrange= $24.8 \pm 4.8\text{km}$

N  
E

干渉計による合成像 (天頂角50度以内)

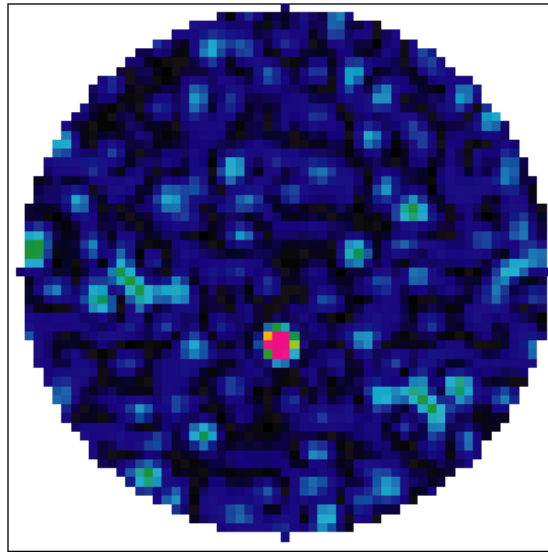


↑ 干渉計データ処理による天球輝度マップ (sin(天頂角), 方位角)

2008

signal intensity (arbitrary unit)

合成像がnoisyなのはside lobeのため  
観測されたピーク的位置に点源を置き、  
像合成をシミュレートすると↓

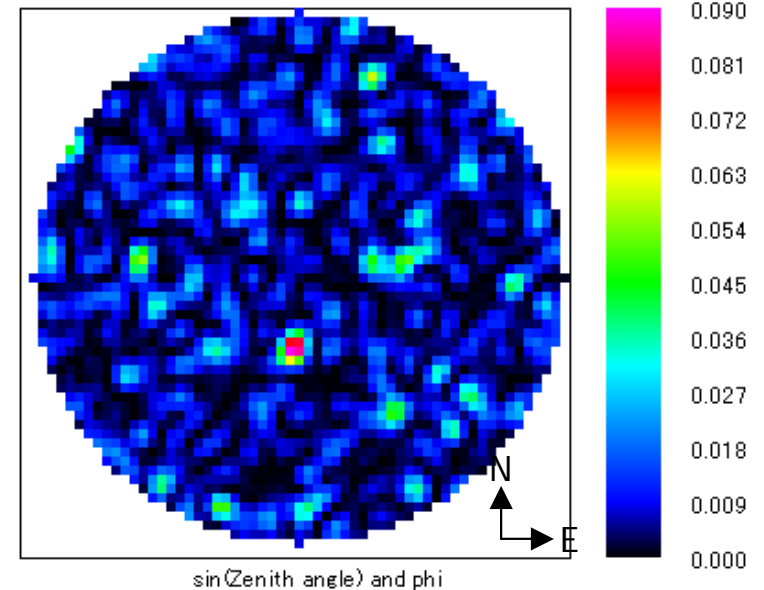


↑ 右の天球輝度マップの最大輝度点と  
その周り数点(6度離れた点)での  
輝度の時間変化

エコーのrange= $24.8 \pm 4.8$ km

(Nのよい例)

干渉計による合成像 (天頂角50度以内)



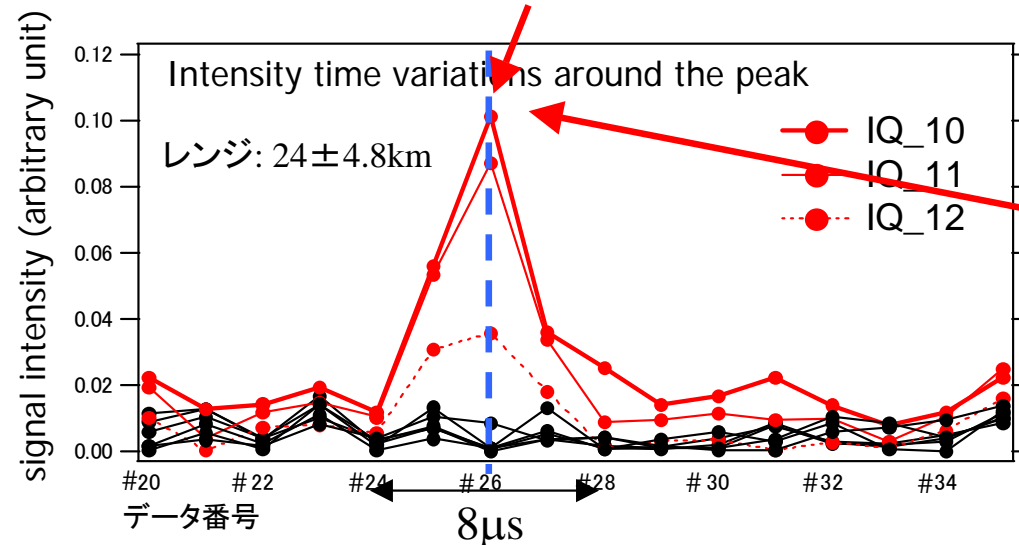
↑ 干渉計データ処理による  
天球輝度マップ  
(sin(天頂角), 方位角)

この観測例のまとめ:

## 見いだした宇宙線エコー候補 (一番S/Nのよい例)

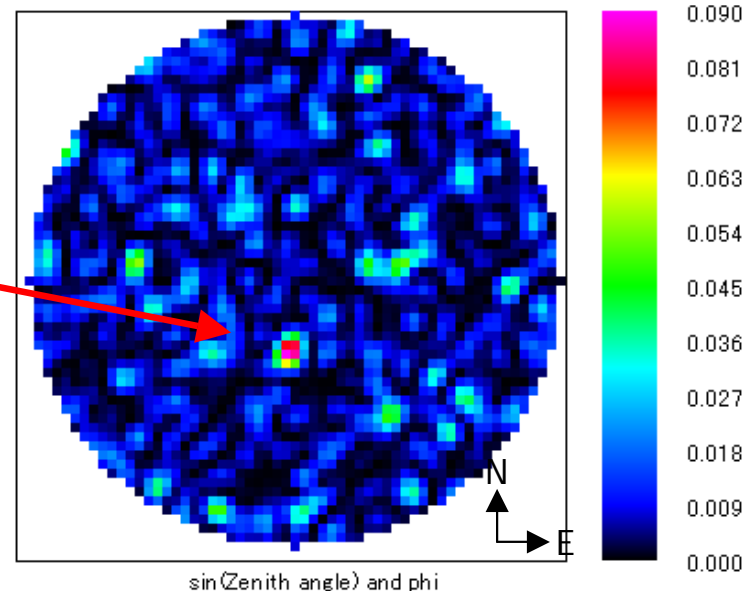
2008/12/3 02:32JST

peak intensity  $\sim 0.10$



N  
E

干渉計による合成像 (天頂角50度以内)



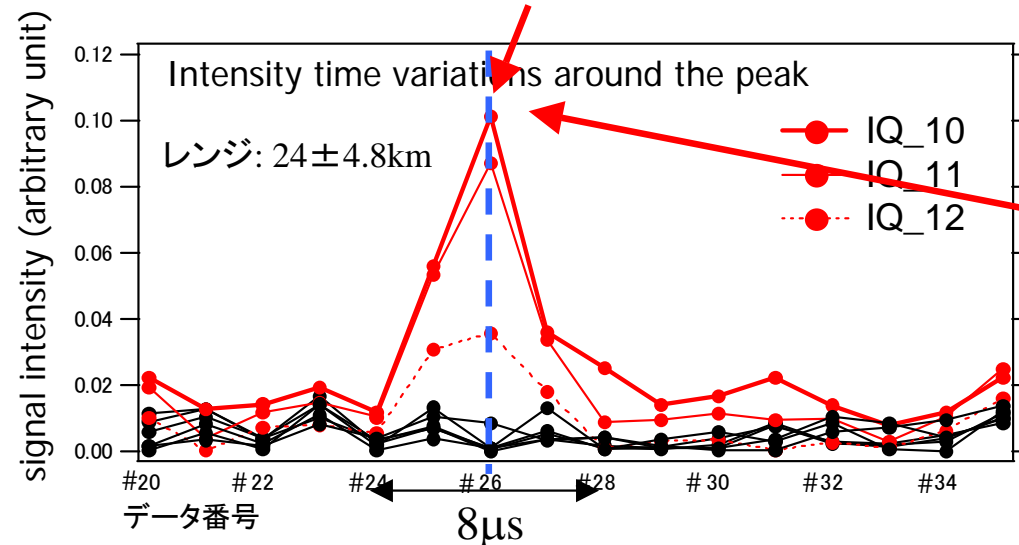
天球の1点が $8\mu$ 秒弱の長さのレーダーエコーを返したことを検出  
(range= $24.8 \pm 4.8\text{km}$ )

この観測例のまとめ:

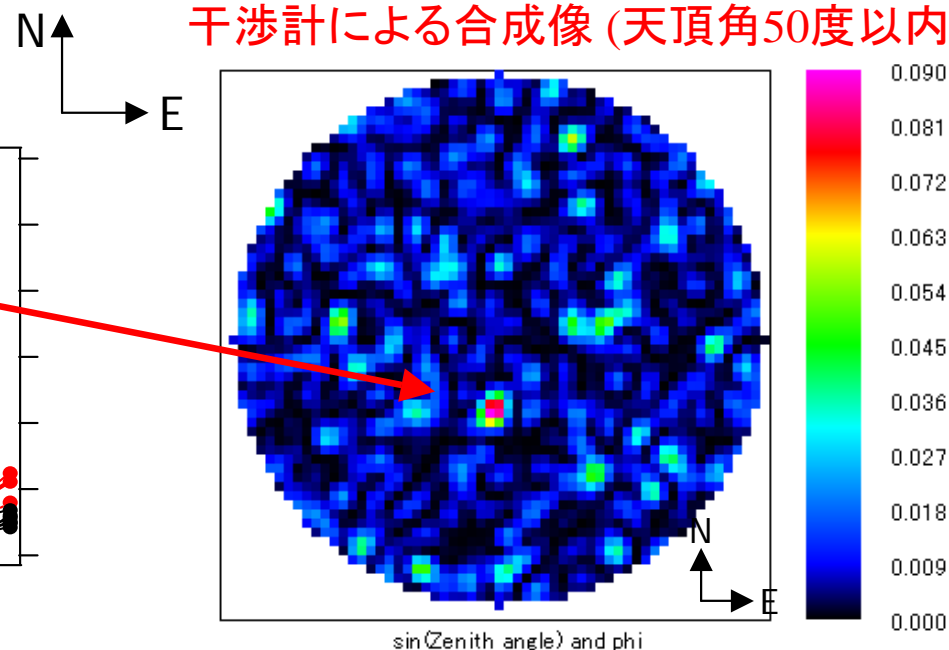
## 見いだした宇宙線エコー候補 (一番S/Nのよい例)

2008/12/3 02:32JST

peak intensity  $\sim 0.10$



干渉計による合成像 (天頂角50度以内)



天球の1点が $8\mu$ 秒弱の長さのレーダーエコーを返したことを検出  
(range= $24.8 \pm 4.8\text{km}$ )

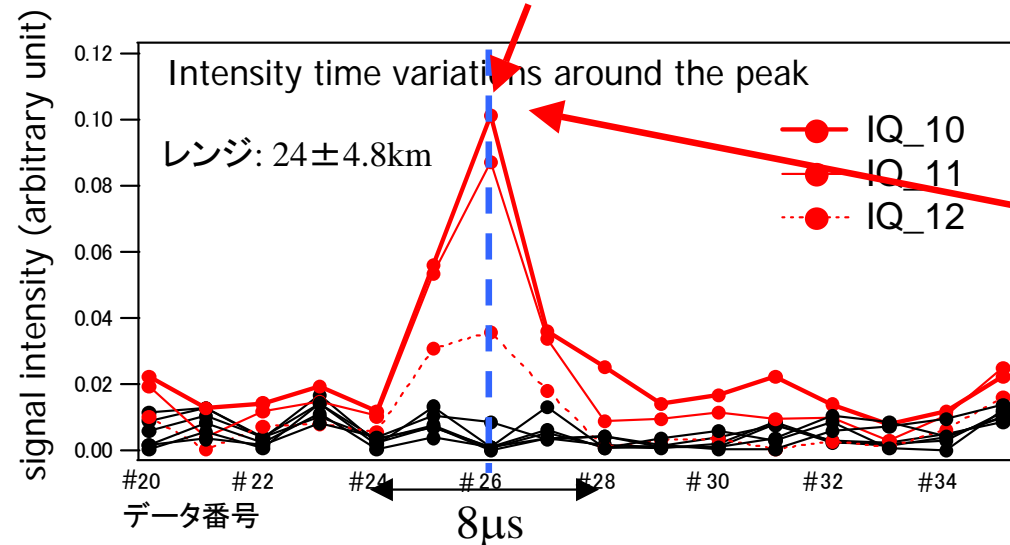
→これは宇宙線エコーの有力候補



この観測例のまとめ:

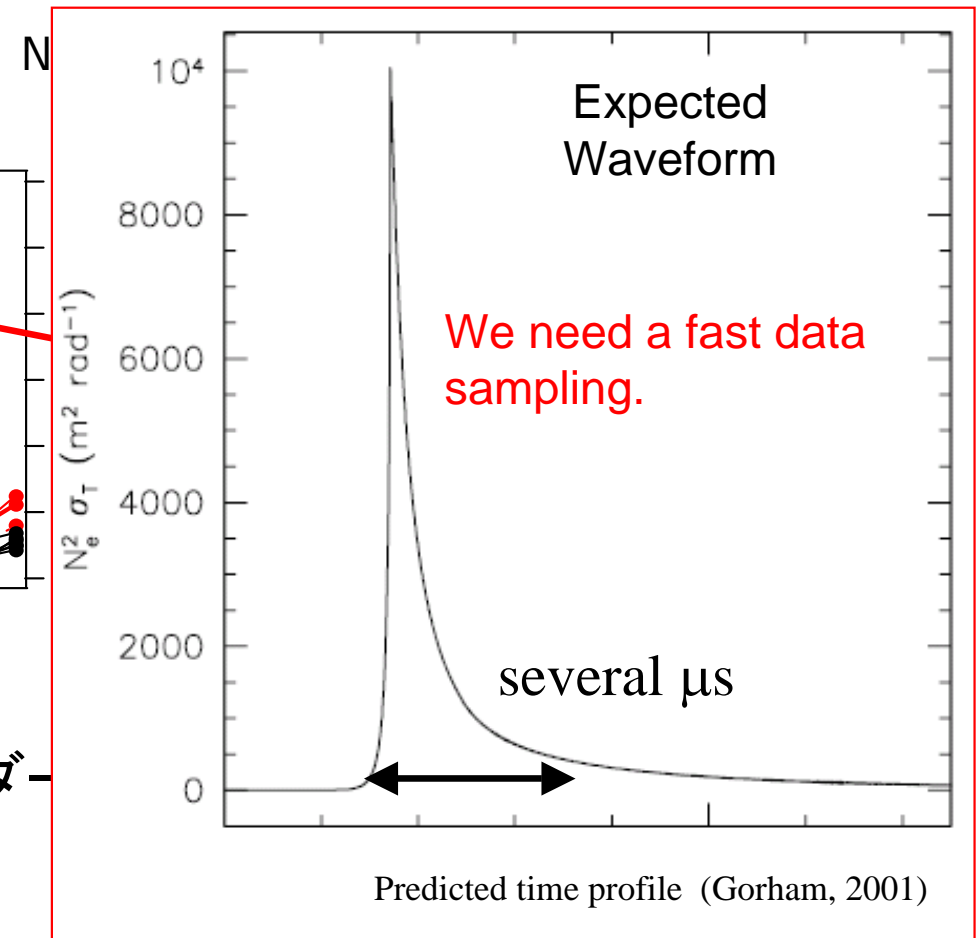
## 見いだした宇宙線エコー候補 (一番S/Nのよい例)

2008/12/3 02:32JST peak intensity  $\sim 0.10$



天球の1点が $8\mu$ 秒弱の長さのレーダー  
(range= $24.8 \pm 4.8\text{km}$ )

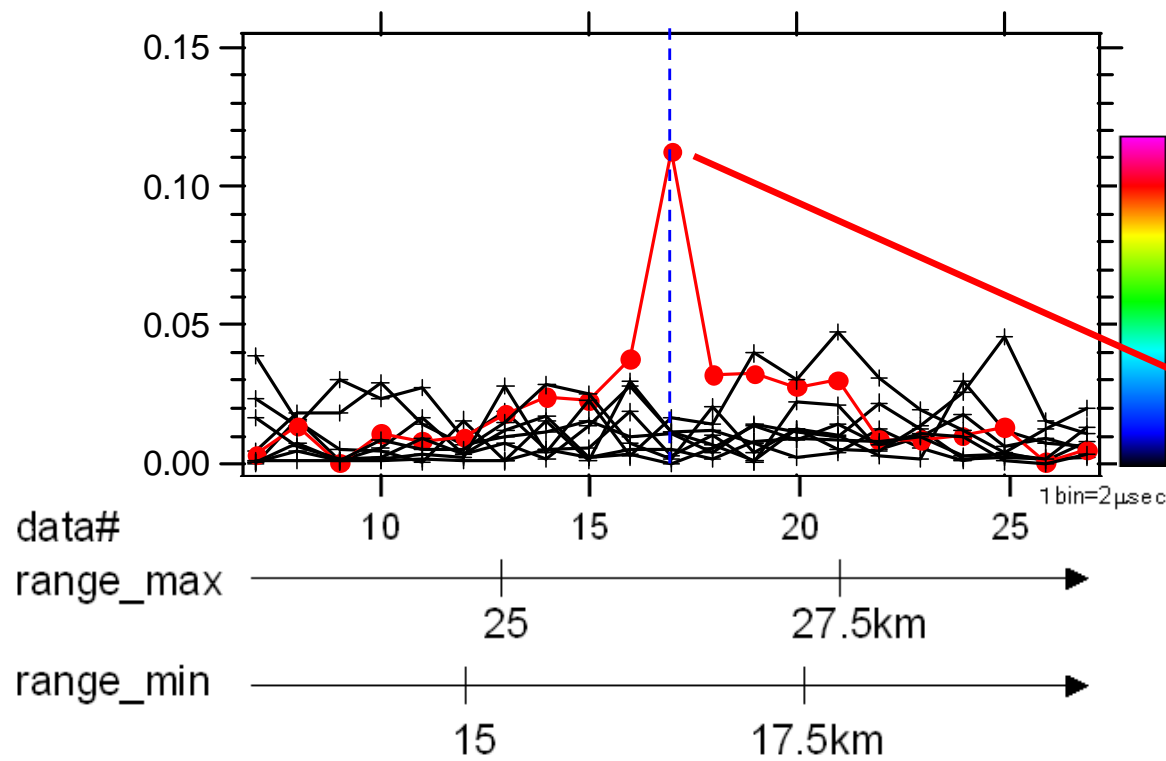
→これは宇宙線エコーの有力候補



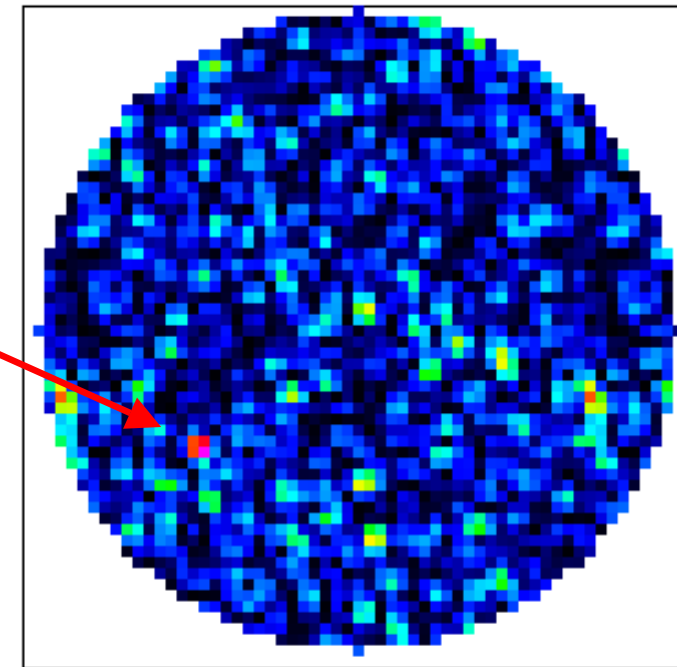
MUI.080909.020441\_CR+zen.txt

BB	nn	hgh	Rmin	Rmax	Zmin	Zmax	zan	ph	IQsynthMax	IQsynthZen
05	422	17	16.80	26.40	13.15	20.67	38.47	216.00	1.123E-001	3.092E-003

(天頂角90度まで、  
探索領域の外も描画)



observed image



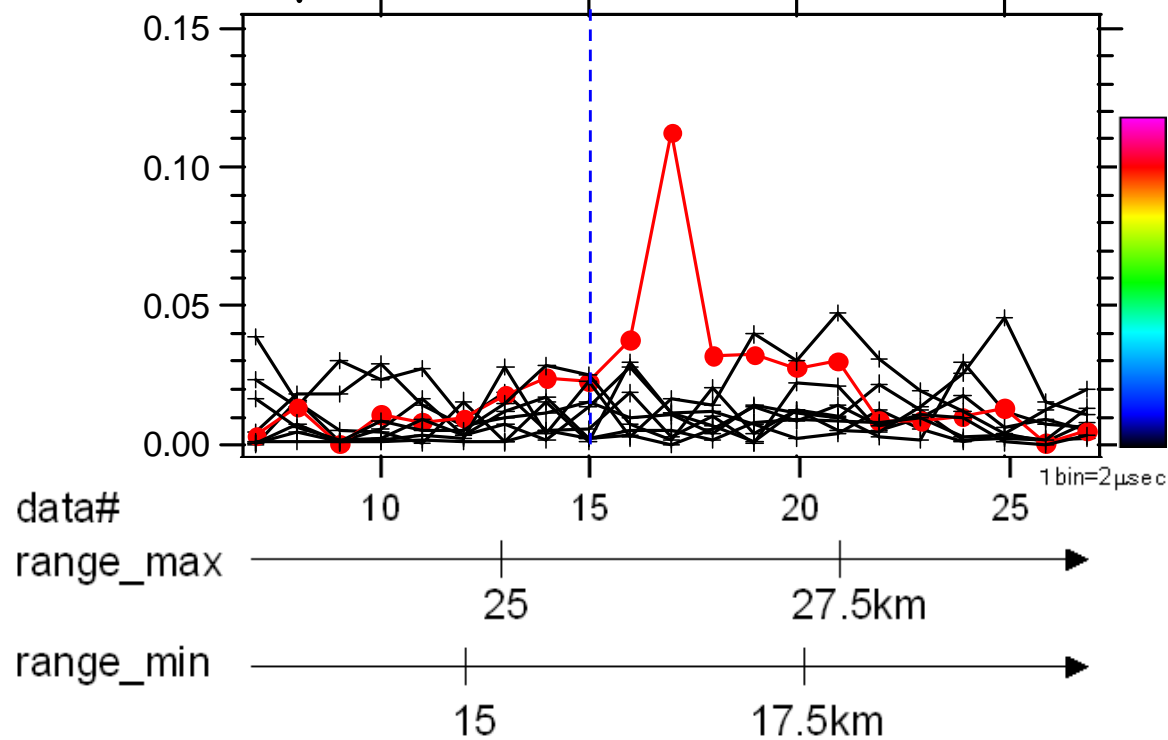
sin(Zenith angle) and phi  
Synthesized image

もう少し怪しい観測例  
(天頂角38.5度)

MUI.080909.020441\_CR+zen.txt

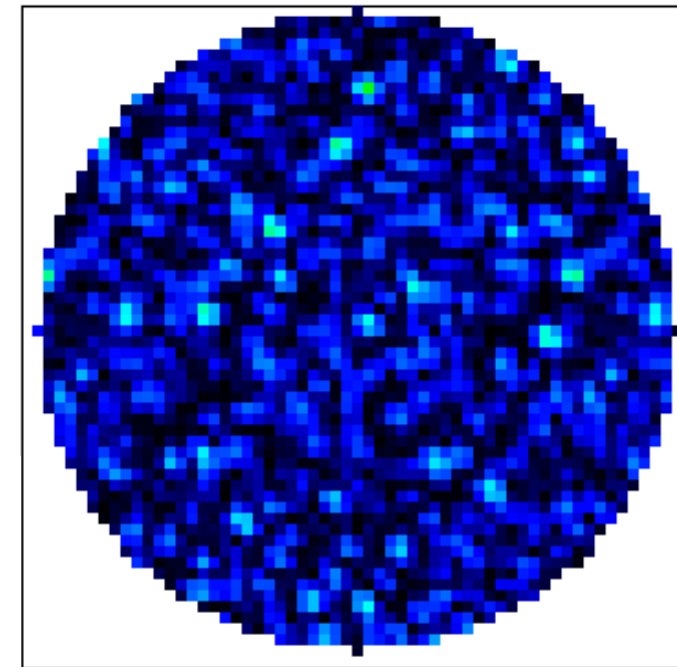
BB	nn	hgh	Rmin	Rmax	Zmin	Zmax	zan	ph	IQsynthMax	IQsynthZen
05	422	17	16.80	26.40	13.15	20.67	38.47	216.00	1.123E-001	3.092E-003

4 $\mu$ s before the event



(天頂角90度まで、  
探索領域の外も描画)

observed image



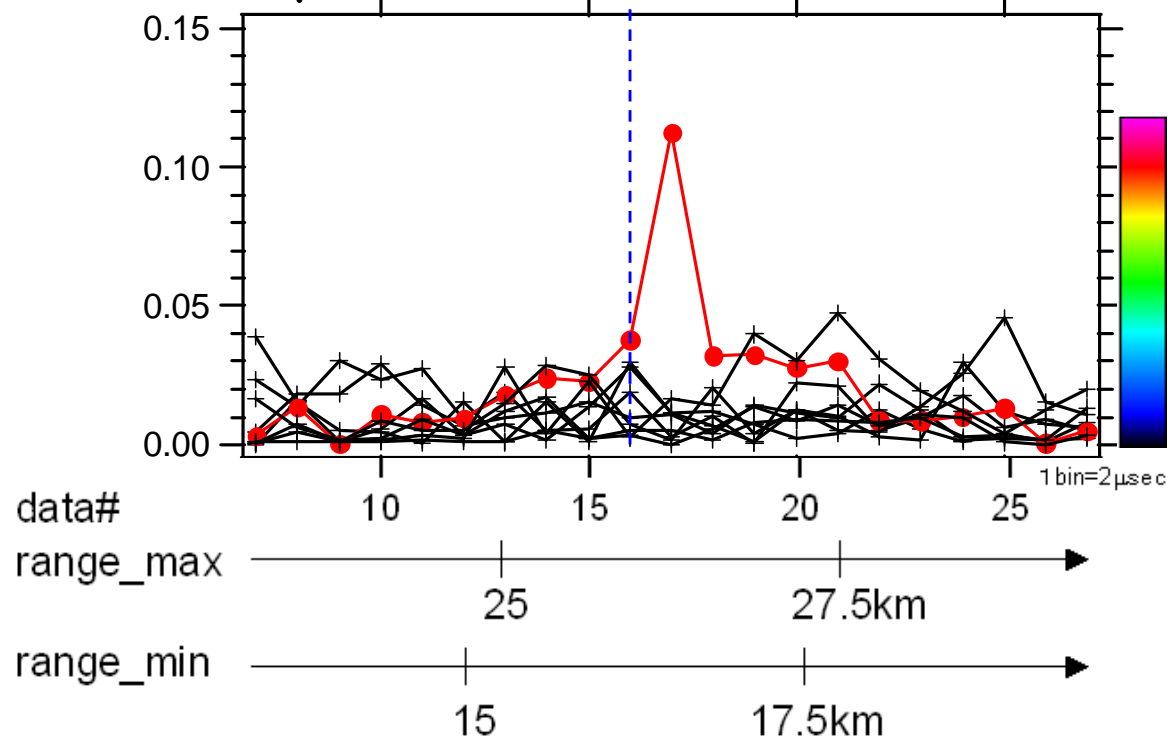
sin(Zenith angle) and phi  
Synthesized image

もう少し怪しい観測例  
(天頂角38.5度)

MUI.080909.020441\_CR+zen.txt

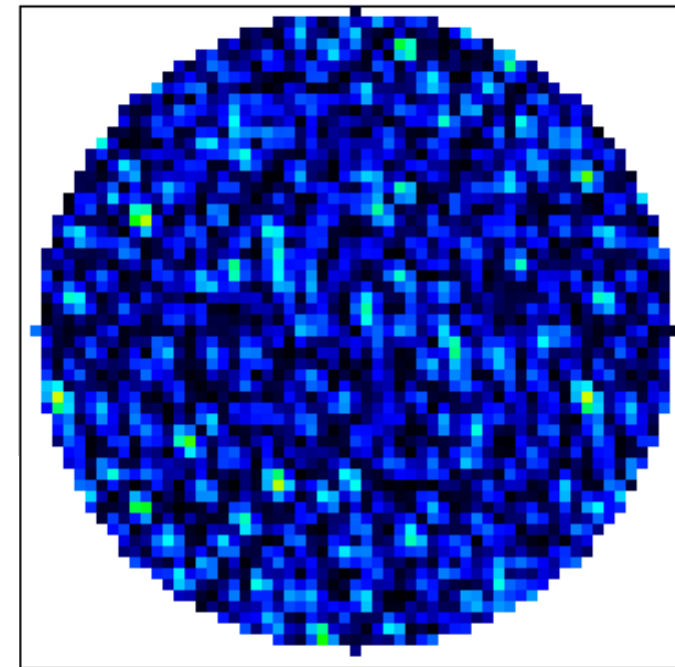
BB	nn	hgh	Rmin	Rmax	Zmin	Zmax	zan	ph	IQsynthMax	IQsynthZen
05	422	17	16.80	26.40	13.15	20.67	38.47	216.00	1.123E-001	3.092E-003

2 $\mu$ s before the event



(天頂角90度まで、  
探索領域の外も描画)

observed image



sin(Zenith angle) and phi

Synthesized image

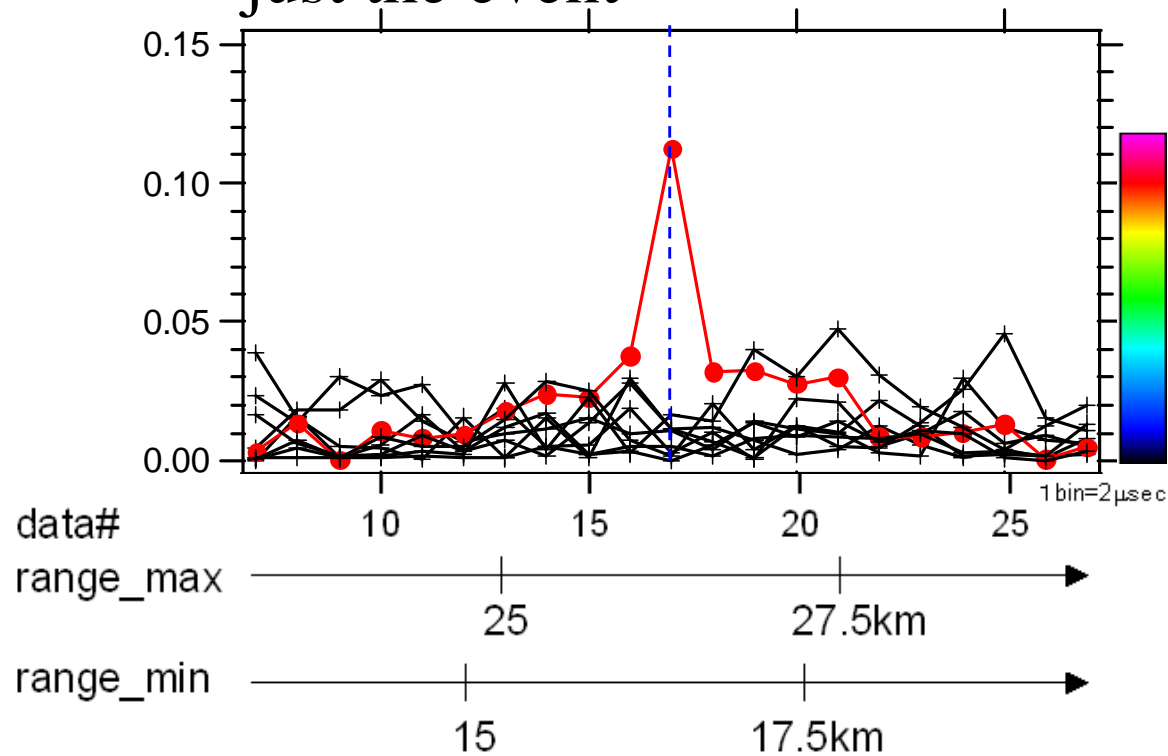
もう少し怪しい観測例  
(天頂角38.5度)



MUI.080909.020441\_CR+zen.txt

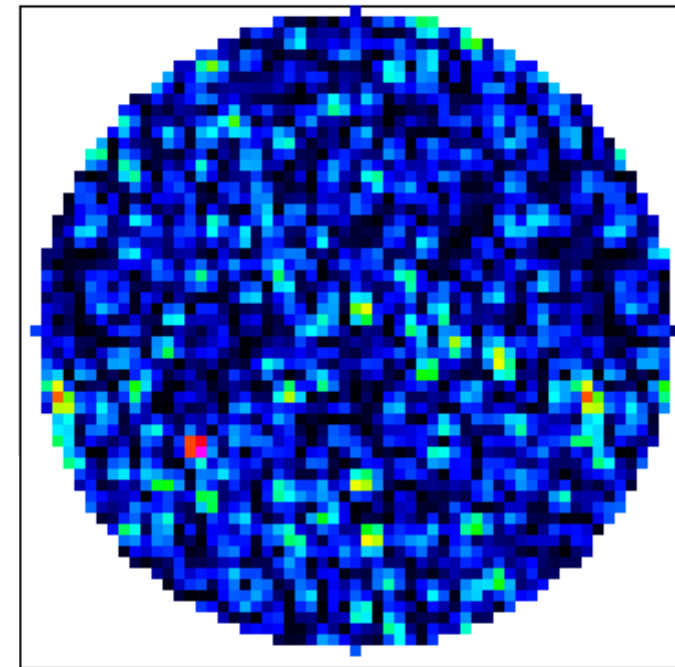
BB	nn	hgh	Rmin	Rmax	Zmin	Zmax	zan	ph	IQsynthMax	IQsynthZen
05	422	17	16.80	26.40	13.15	20.67	38.47	216.00	1.123E-001	3.092E-003

just the event



(天頂角90度まで、  
探索領域の外も描画)

observed image



sin(Zenith angle) and phi

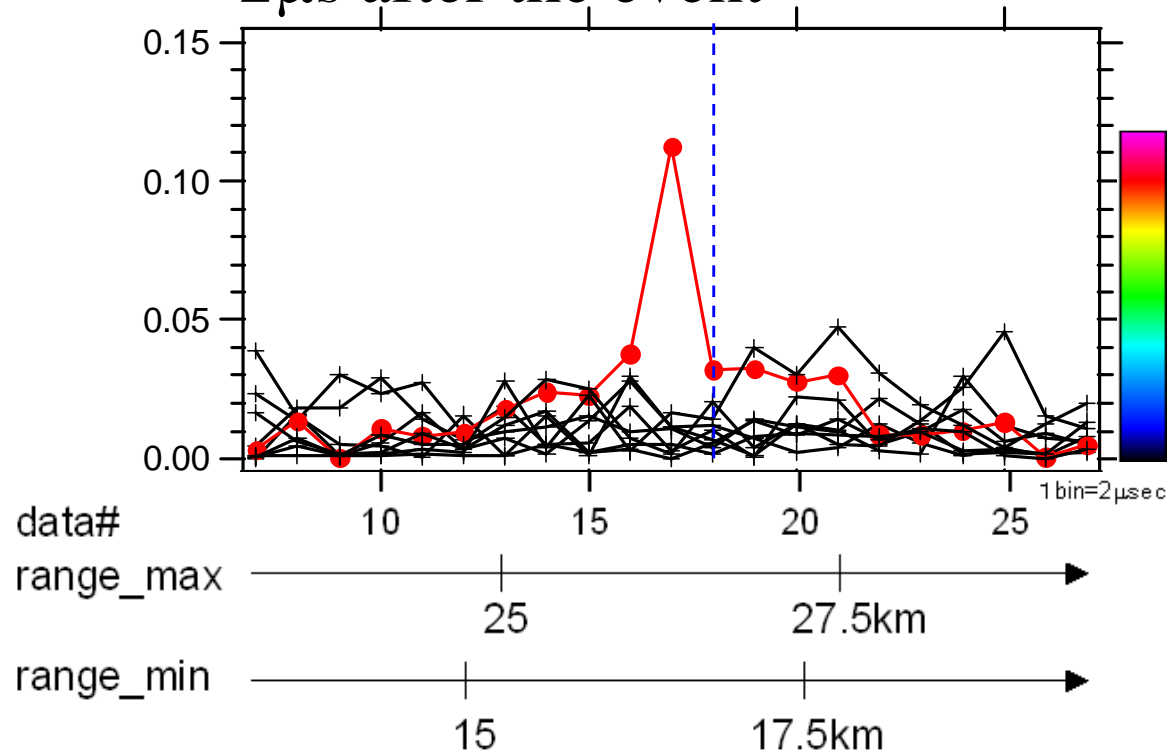
Synthesized image

もう少し怪しい観測例  
(天頂角38.5度)

MUI.080909.020441\_CR+zen.txt

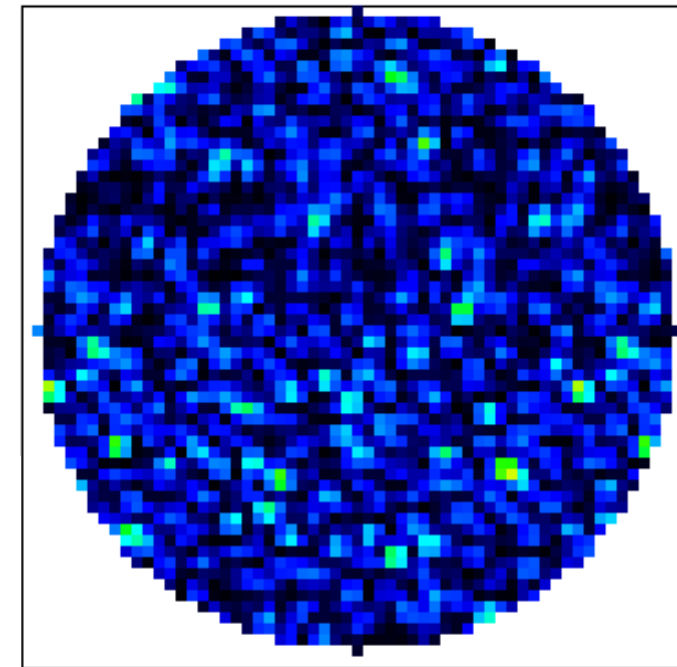
BB	nn	hgh	Rmin	Rmax	Zmin	Zmax	zan	ph	IQsynthMax	IQsynthZen
05	422	17	16.80	26.40	13.15	20.67	38.47	216.00	1.123E-001	3.092E-003

2 $\mu$ s after the event



(天頂角90度まで、  
探索領域の外も描画)

observed image



sin(Zenith angle) and phi  
Synthesized image

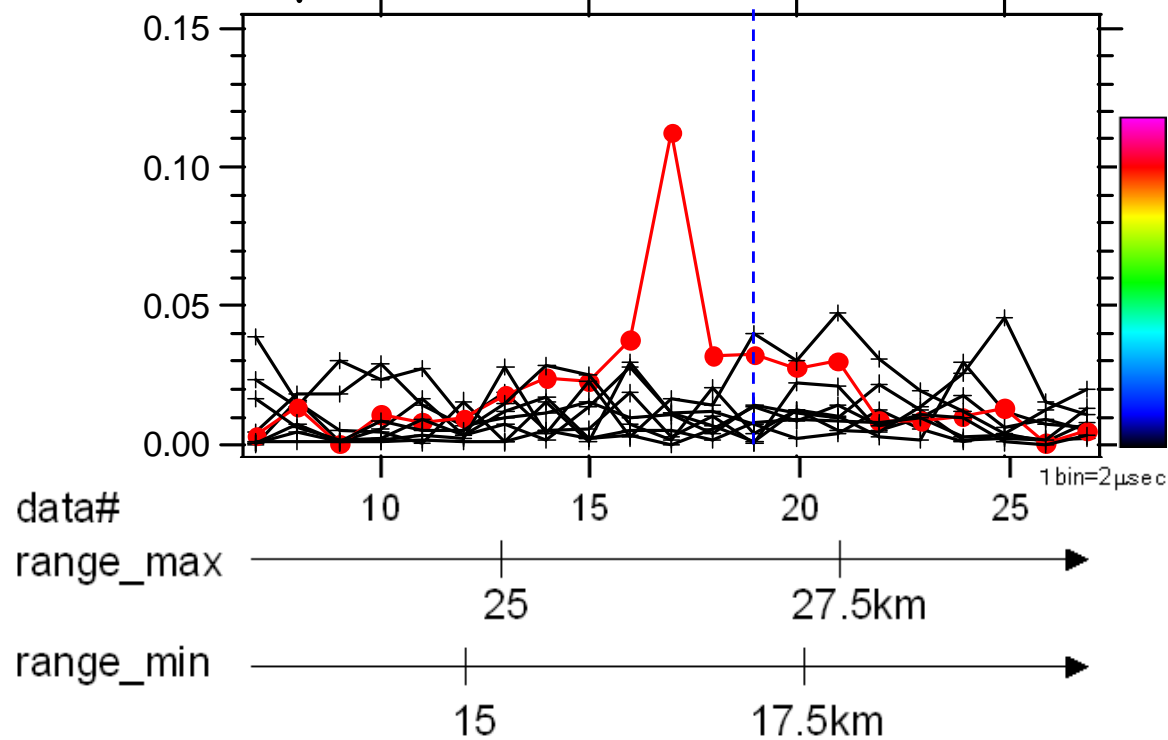
もう少し怪しい観測例  
(天頂角38.5度)

MUI.080909.020441\_CR+zen.txt

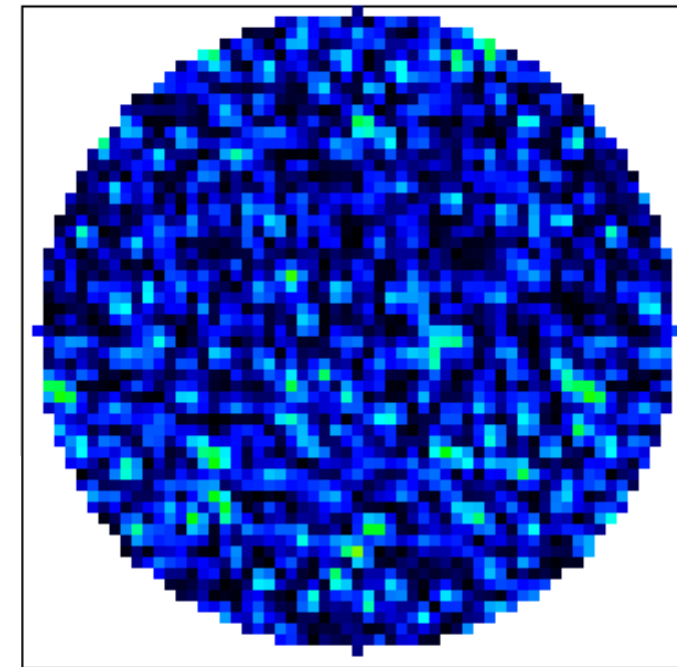
BB	nn	hgh	Rmin	Rmax	Zmin	Zmax	zan	ph	IQsynthMax	IQsynthZen
05	422	17	16.80	26.40	13.15	20.67	38.47	216.00	1.123E-001	3.092E-003

(天頂角90度まで、  
探索領域の外も描画)

4 $\mu$ s after the event



observed image



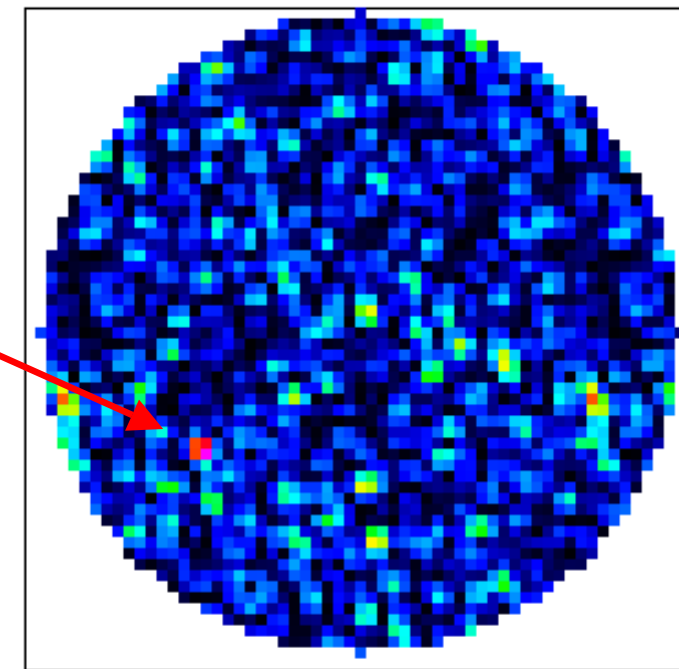
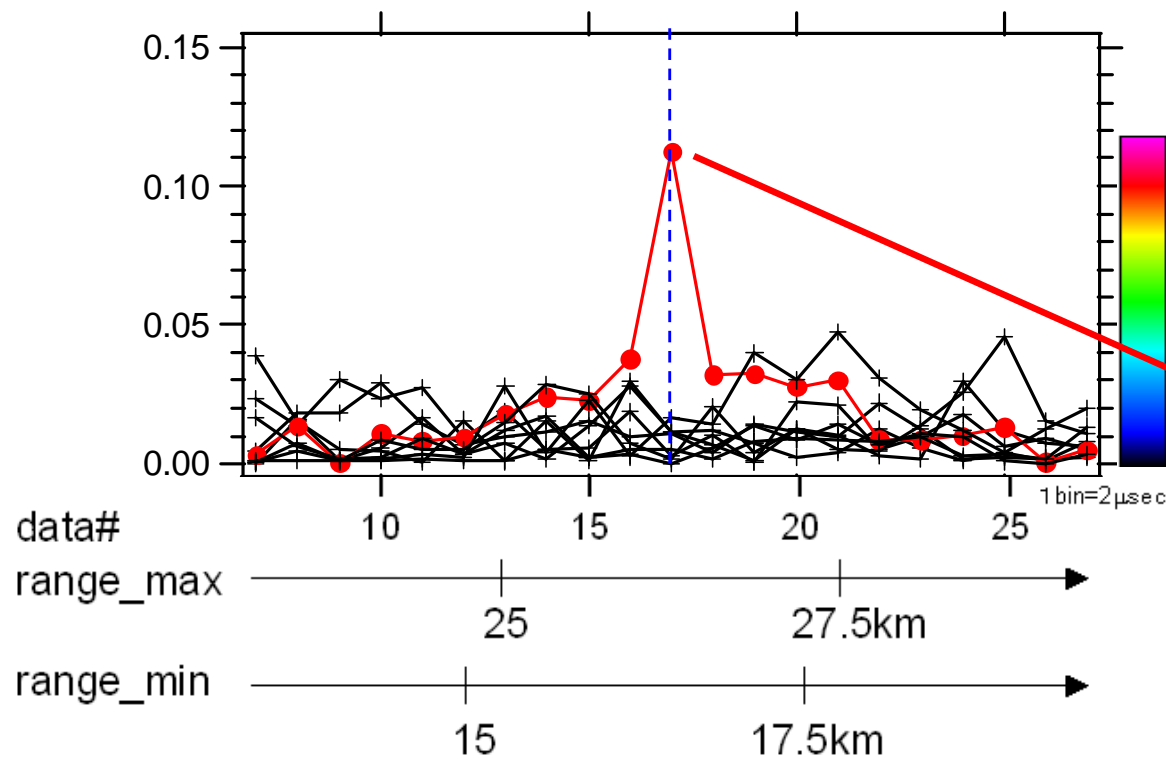
sin(Zenith angle) and phi  
Synthesized image

もう少し怪しい観測例  
(天頂角38.5度)

MUI.080909.020441\_CR+zen.txt

BB	nn	hgh	Rmin	Rmax	Zmin	Zmax	zan	ph	IQsynthMax	IQsynthZen
05	422	17	16.80	26.40	13.15	20.67	38.47	216.00	1.123E-001	3.092E-003

(天頂角90度まで、  
探索領域の外も描画)



sin(Zenith angle) and phi  
Synthesized image

もう少し怪しい観測例  
(天頂角38.5度)

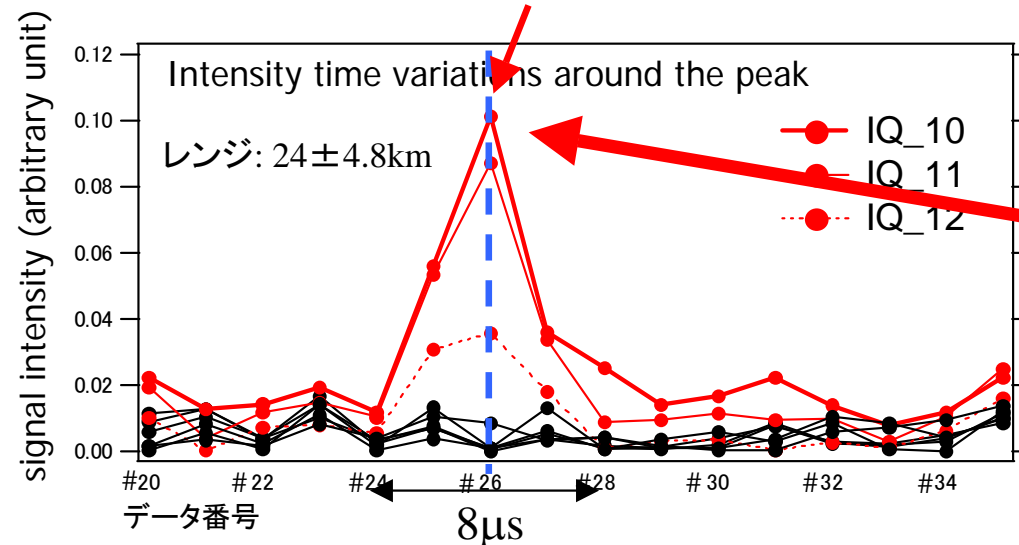


前の例に戻る:

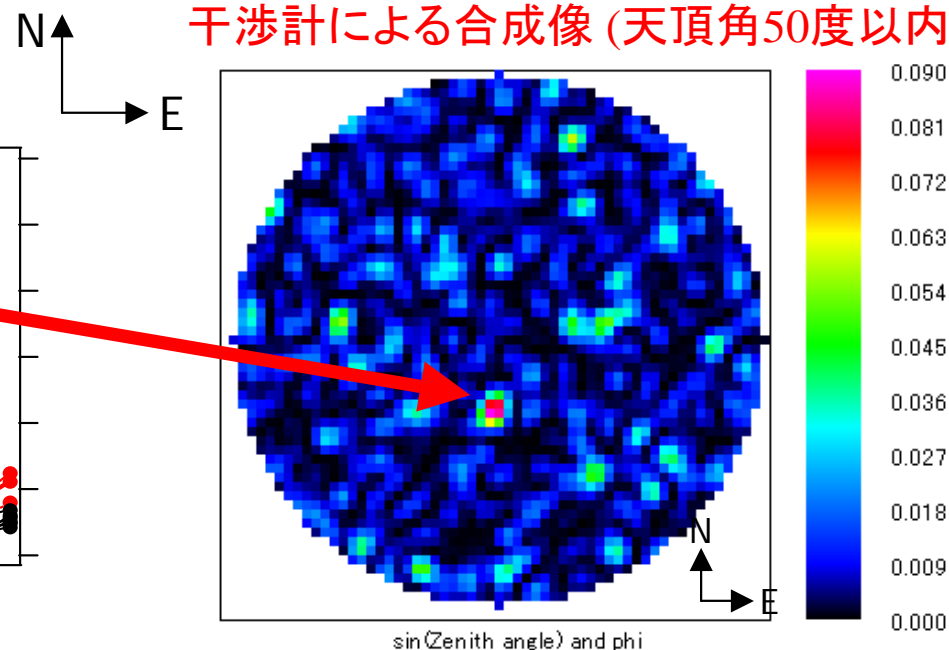
## 見いだした宇宙線エコー候補 (一番S/Nのよい例)

2008/12/3 02:32JST

peak intensity  $\sim 0.10$



干渉計による合成像 (天頂角50度以内)



天球の1点が $8\mu$ 秒弱の長さのレーダーエコーを返したことを検出 (range= $24.8 \pm 4.8\text{km}$ )

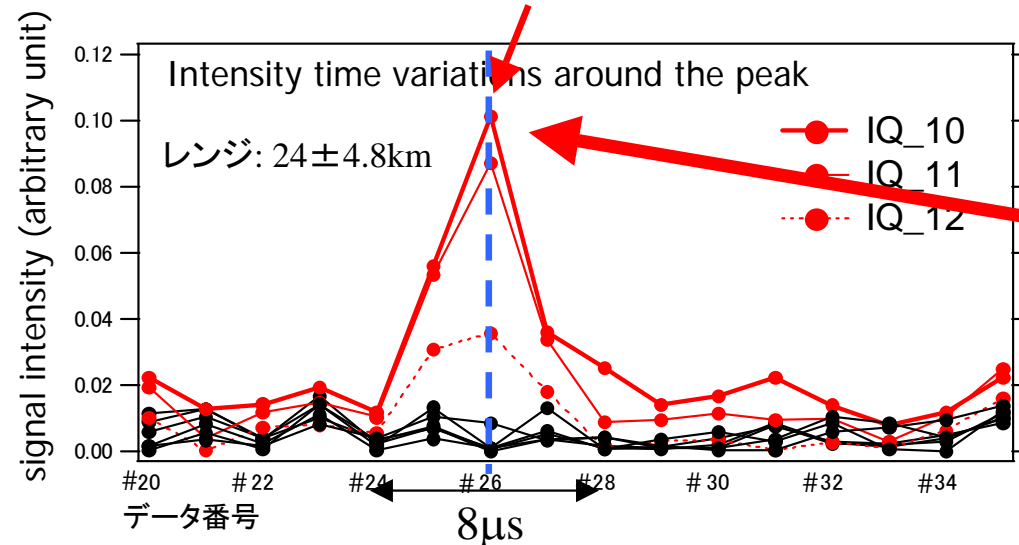
→これは宇宙線エコーの有力候補

前の例に戻る:

## 見いだした宇宙線エコー候補 (一番S/Nのよい例)

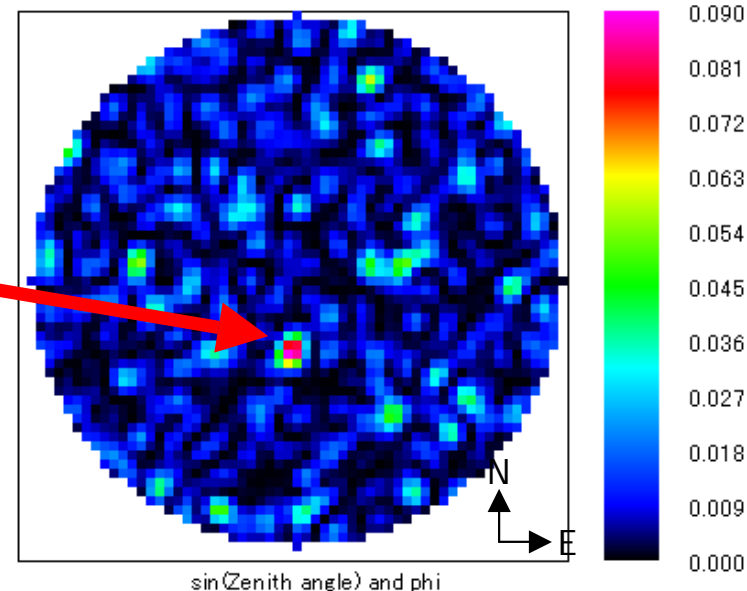
2008/12/3 02:32JST

peak intensity  $\sim 0.10$



N  
E

干渉計による合成像 (天頂角50度以内)



天球の1点が $8\mu$ 秒弱の長さのレーダーエコーを返したことを検出 (range= $24.8 \pm 4.8\text{km}$ )

→これは宇宙線エコーの有力候補

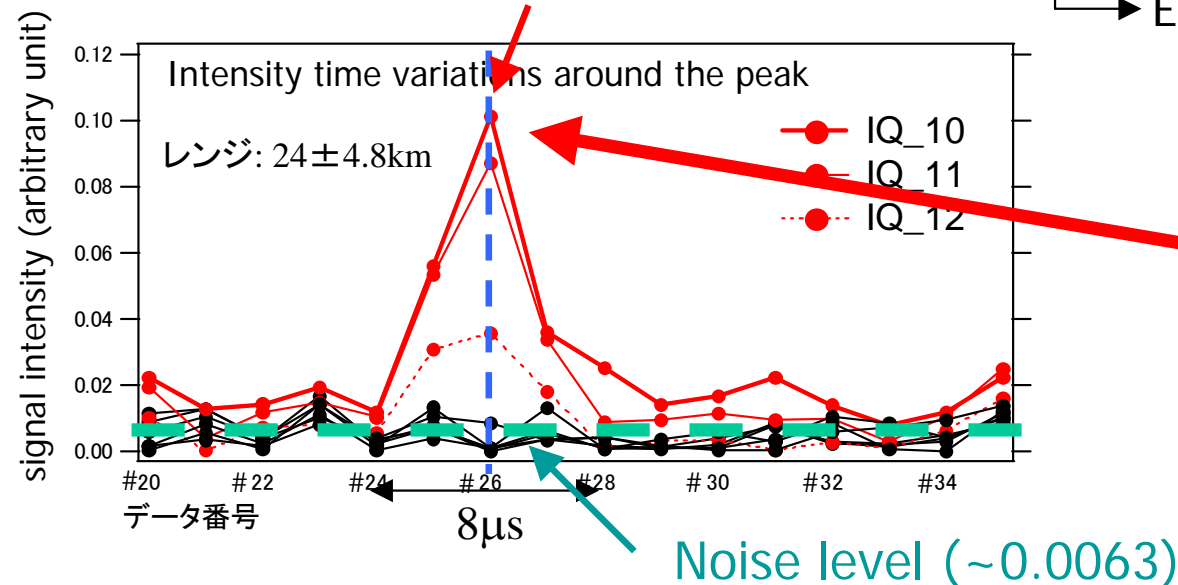
→宇宙線エネルギー推定には、アンテナ・受信機の感度を較正して、エコーの電波強度を求めなければならない。

前の例に戻る:

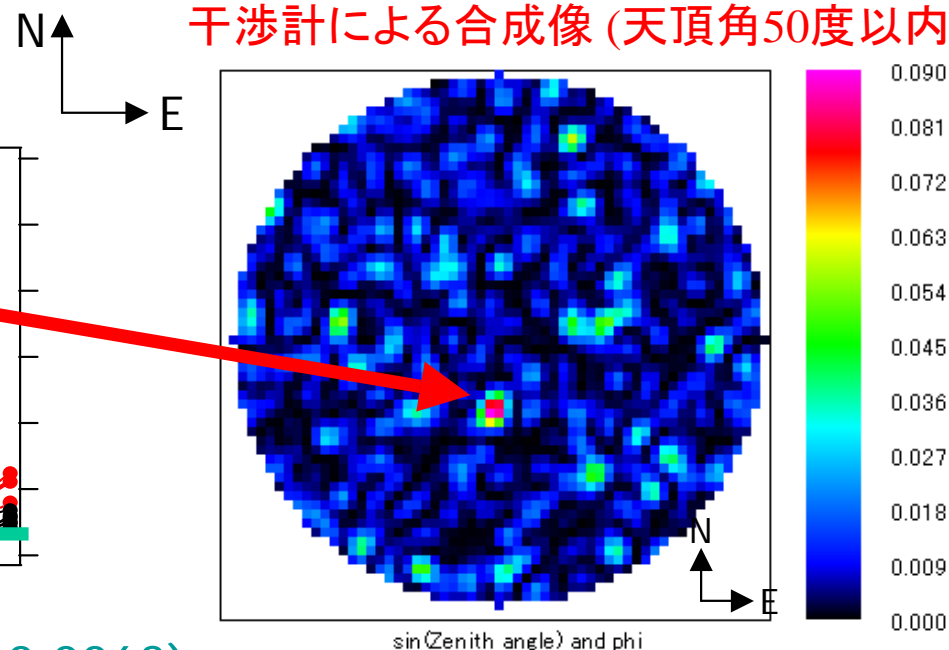
## 見いだした宇宙線エコー候補 (一番S/Nのよい例)

2008/12/3 02:32JST

peak intensity  $\sim 0.10$



干渉計による合成像 (天頂角50度以内)



天球の1点が8  $\mu$ 秒弱の長さのレーダーエコーを返したことを検出 (range= $24.8 \pm 4.8\text{km}$ )

→これは宇宙線エコーの有力候補

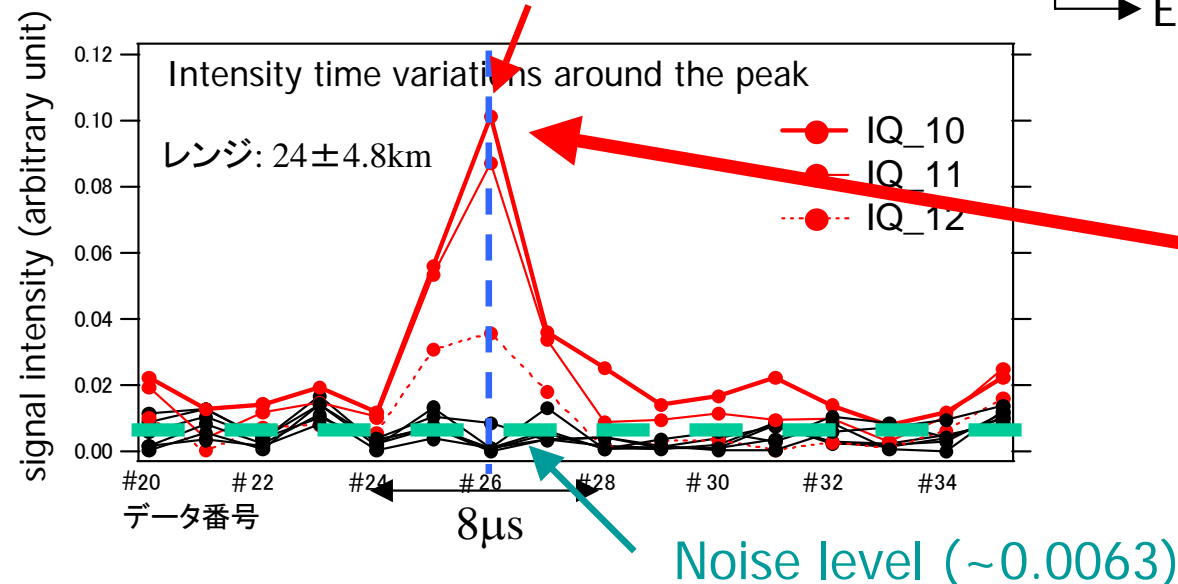
→宇宙線エネルギー推定には、アンテナ・受信機の感度を較正して、エコーの電波強度を求めなければならない。

前の例に戻る:

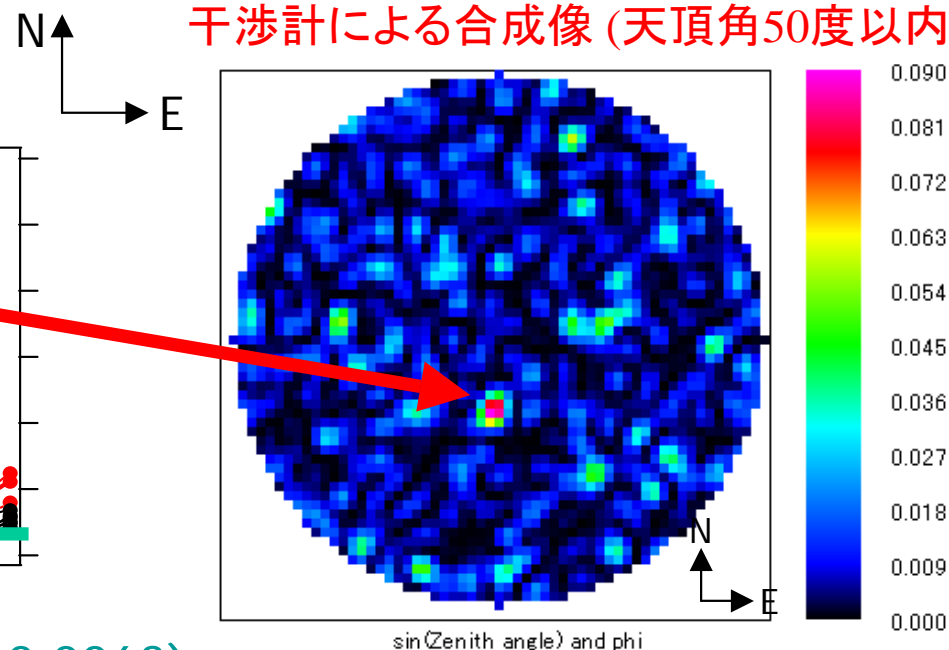
## 見いだした宇宙線エコー候補 (一番S/Nのよい例)

2008/12/3 02:32JST

peak intensity  $\sim 0.10$



干渉計による合成像 (天頂角50度以内)



天球の1点が8 $\mu$ 秒弱の長さのレーダーエコーを返したことを検出 (range= $24.8 \pm 4.8\text{km}$ )

→これは宇宙線エコーの有力候補

**S/N=16**

→宇宙線エネルギー推定には、アンテナ・受信機の感度を校正して、エコーの電波強度を求めなければならない。

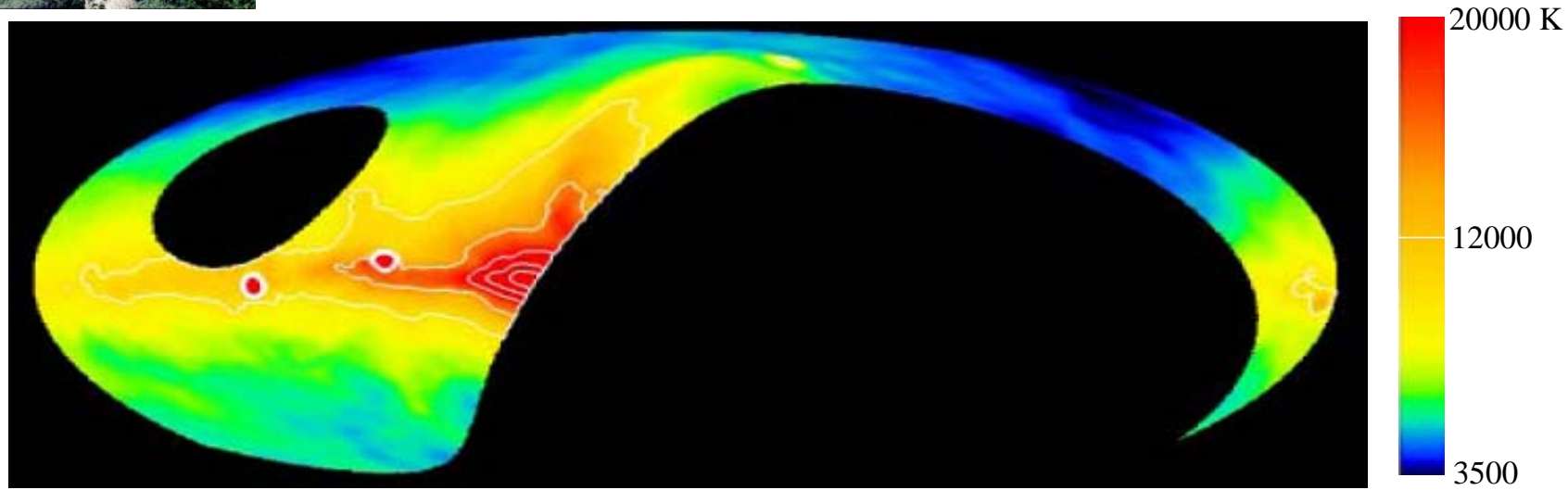




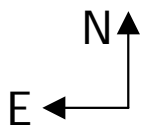
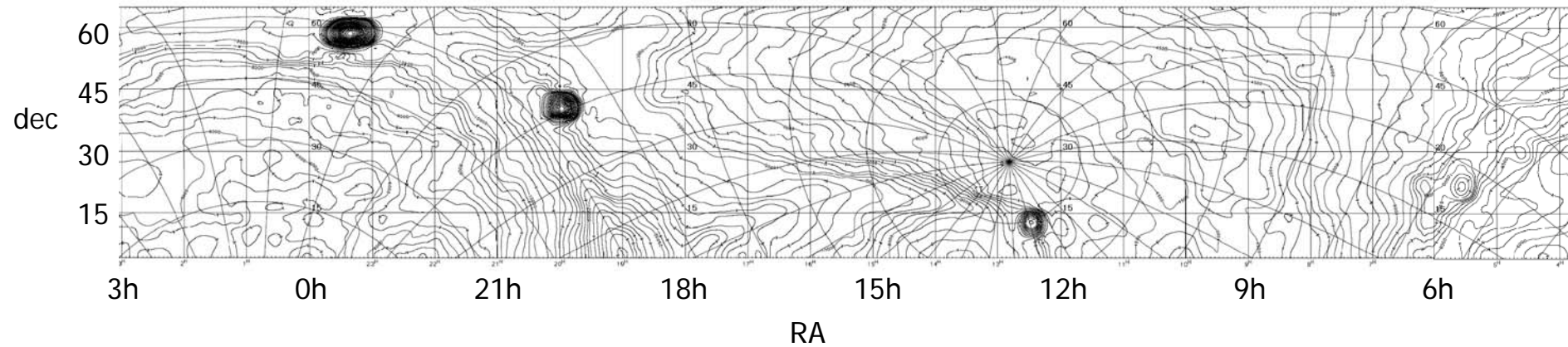
# レーダー受信機の感度較正: 銀河雑音による

MU北天電波マップ (46.5MHz; 銀河座標)

Maeda et al. (1999)



## 赤道座標

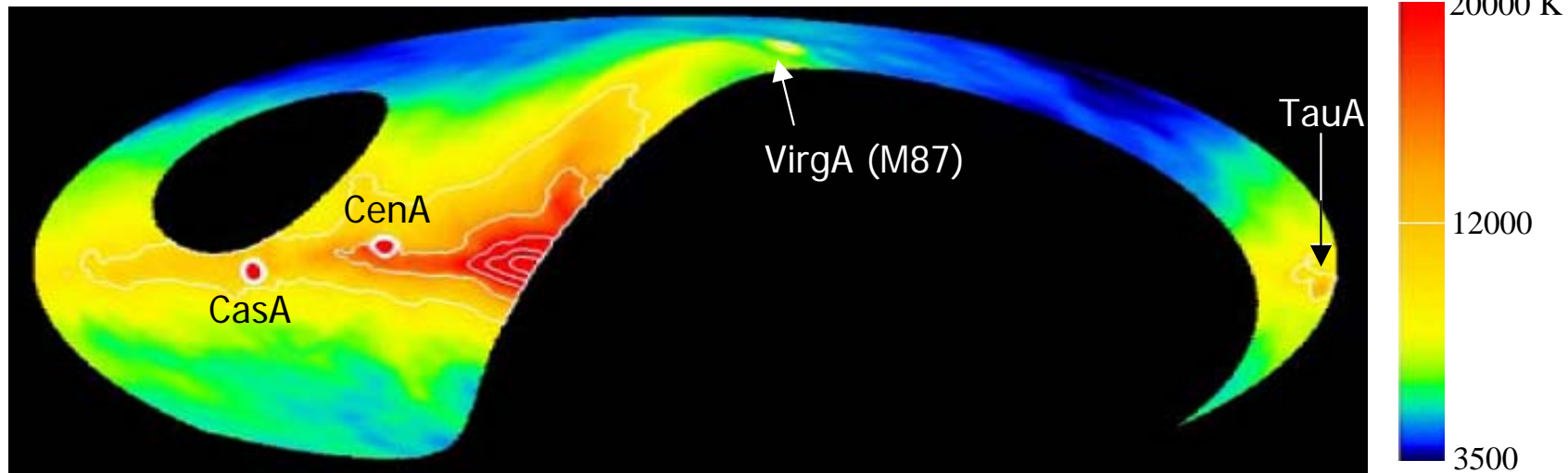




# レーダー受信機の感度校正: 銀河雑音による

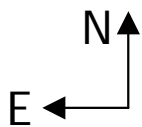
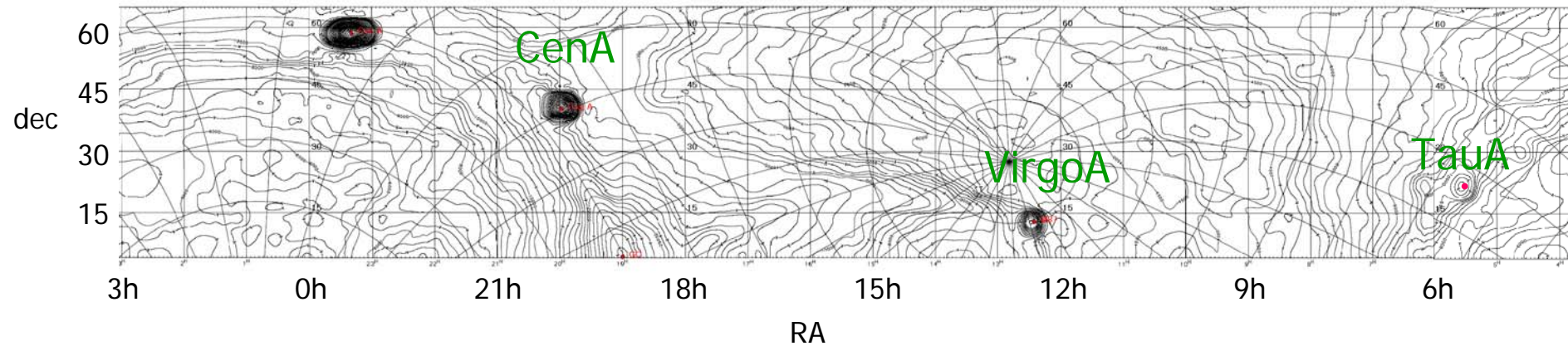
MU北天電波マップ (46.5MHz; 銀河座標)

Maeda et al. (1999)



赤道座標

CasA



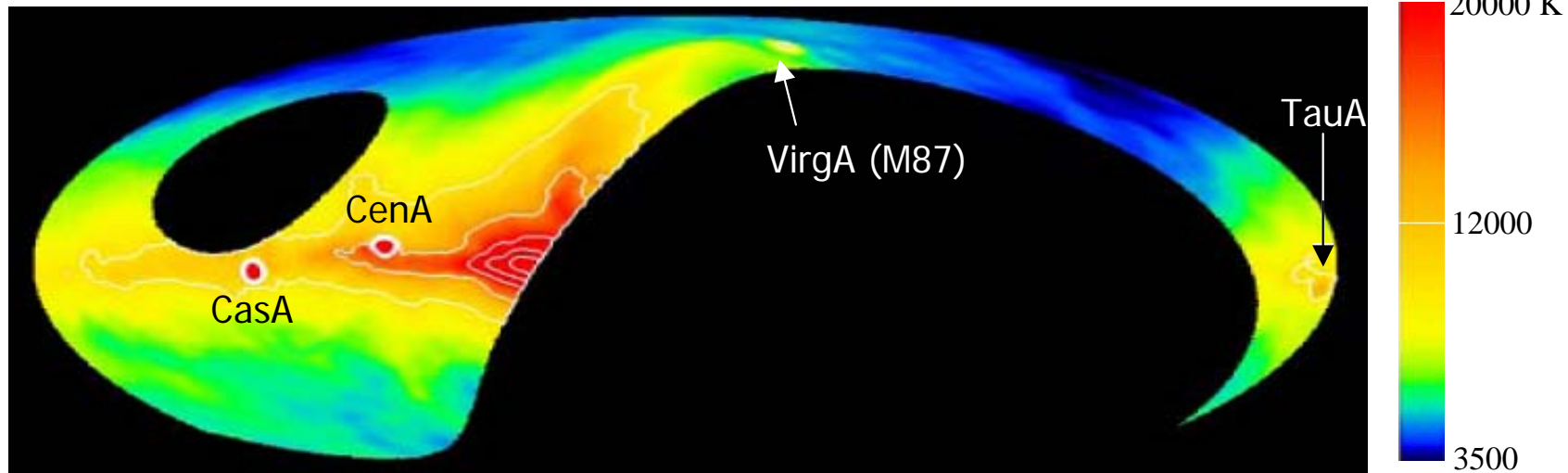




# レーダー受信機の感度校正: 銀河雑音による

MU北天電波マップ (46.5MHz; 銀河座標)

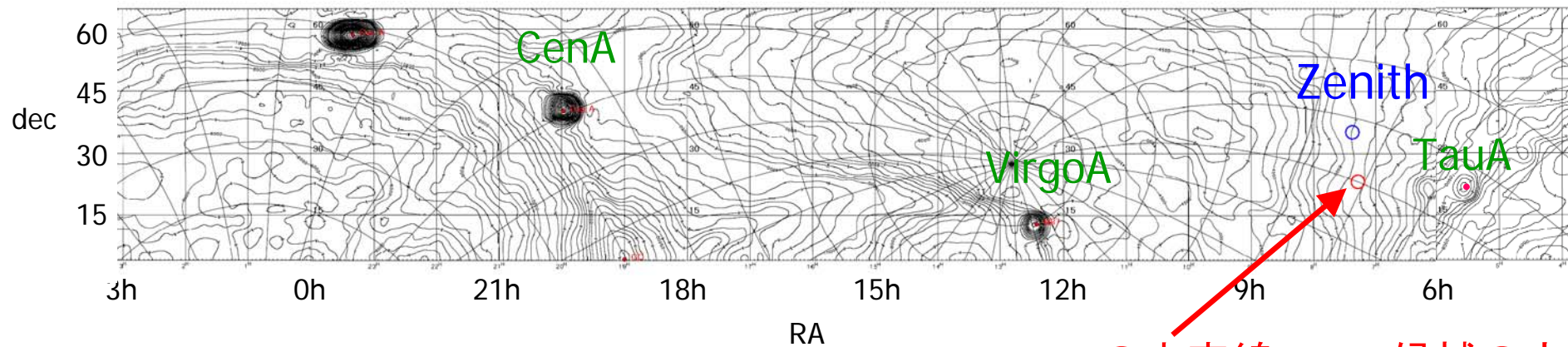
Maeda et al. (1999)



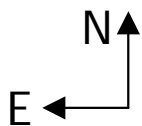
赤道座標

CasA

3 Dec 2009, 02:32JST



この宇宙線エコー候補の方向

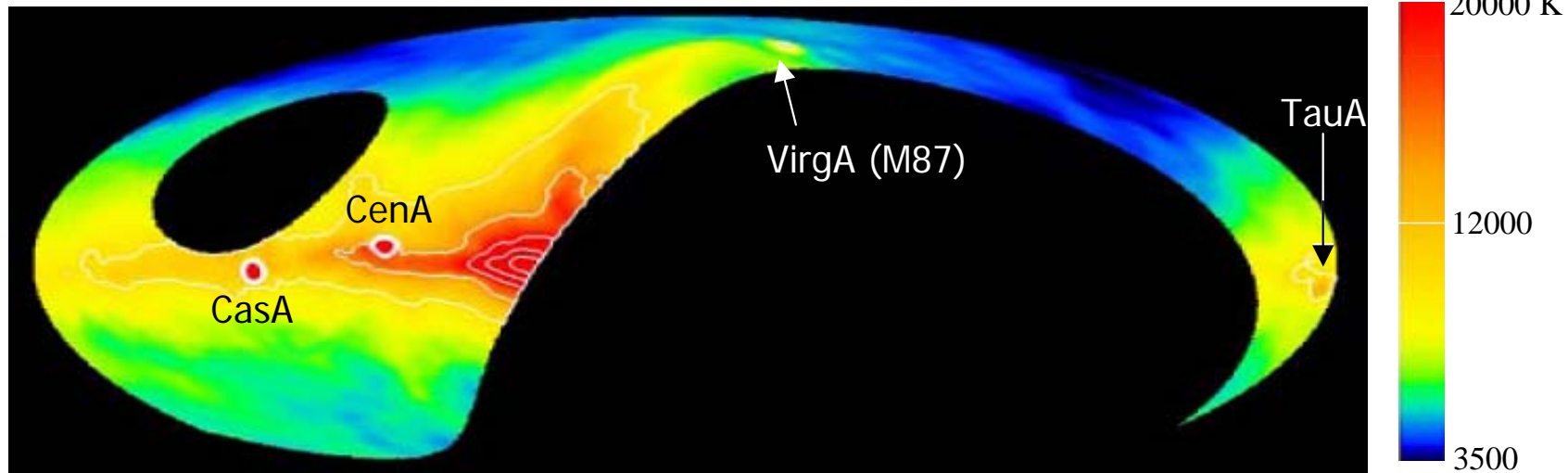




# レーダー受信機の感度校正: 銀河雑音による

MU北天電波マップ (46.5MHz; 銀河座標)

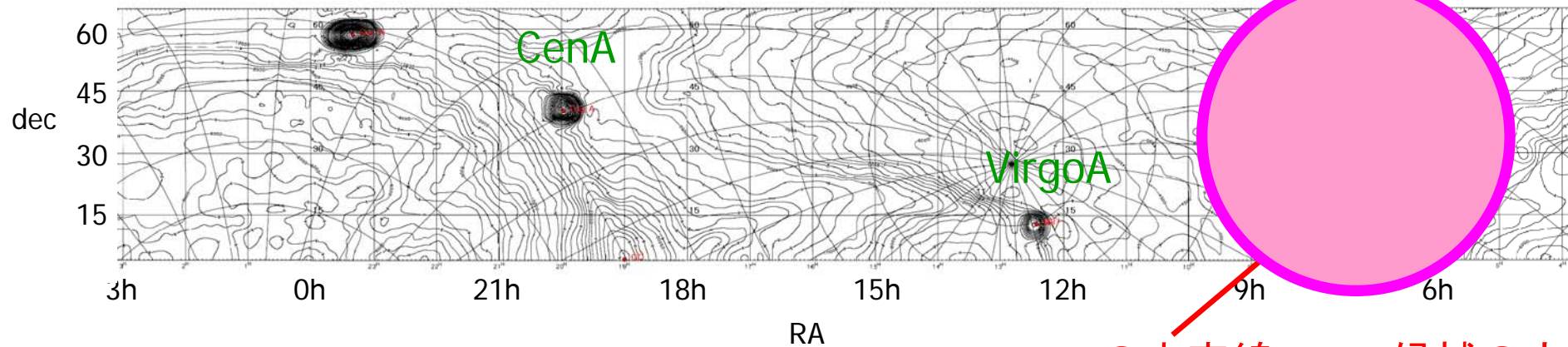
Maeda et al. (1999)



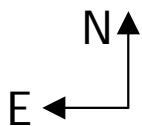
赤道座標

CasA

3 Dec 2009, 02:32JST



この宇宙線エコー候補の方向  
平均輝度 $\sim 7000\text{K}$





銀河雑音とシステム内部雑音を合計して、雑音温度を  $T_N = 10^4$  度とする。  
2008.9-2009.2 の MU 観測における受信帯域  $\Delta f$  は 500kHz であったので、雑音  
強度  $N$  は

$$N = k_B T_N \Delta f = 1.38 \times 10^{-23} \times 10^4 \times 5 \times 10^5 = 6.9 \times 10^{-14} \text{ [W]} \quad (1)$$

2008.12.3 02:31:51.6JST の宇宙線エコー候補については  $S/N=16$  であったので、  
後方散乱波の強度  $P_r$  として、

$$P_r = 16 \times N_{tot} = 16 \times 6.9 \times 10^{-14} = 1.1 \times 10^{-12} \text{ [W]} \quad (2)$$

を得る。

銀河雑音とシステム内部雑音を合計して、雑音温度を  $T_N = 10^4$  度とする。  
2008.9-2009.2 の MU 観測における受信帯域  $\Delta f$  は 500kHz であったので、雑音  
強度  $N$  は

$$N = k_B T_N \Delta f = 1.38 \times 10^{-23} \times 10^4 \times 5 \times 10^5 = 6.9 \times 10^{-14} \text{ [W]} \quad (1)$$

2008.12.3 02:31:51.6JST の宇宙線エコー候補については  $S/N=16$  であったので、  
後方散乱波の強度  $P_r$  として、

$$P_r = 16 \times N_{tot} = 16 \times 6.9 \times 10^{-14} = 1.1 \times 10^{-12} \text{ [W]} \quad (2)$$

を得る。

銀河雑音とシステム内部雑音を合計して、雑音温度を  $T_N = 10^4$  度とする。  
2008.9-2009.2 の MU 観測における受信帯域  $\Delta f$  は 500kHz であったので、雑音  
強度  $N$  は

$$N = k_B T_N \Delta f = 1.38 \times 10^{-23} \times 10^4 \times 5 \times 10^5 = 6.9 \times 10^{-14} \text{ [W]} \quad (1)$$

2008.12.3 02:31:51.6JST の宇宙線エコー候補については  $S/N=16$  であったので、  
後方散乱波の強度  $P_r$  として、

$$P_r = 16 \times N_{tot} = 16 \times 6.9 \times 10^{-14} = 1.1 \times 10^{-12} \text{ [W]} \quad (2)$$

を得る。

銀河雑音とシステム内部雑音を合計して、雑音温度を  $T_N = 10^4$  度とする。  
2008.9-2009.2 の MU 観測における受信帯域  $\Delta f$  は 500kHz であったので、雑音  
強度  $N$  は

$$N = k_B T_N \Delta f = 1.38 \times 10^{-23} \times 10^4 \times 5 \times 10^5 = 6.9 \times 10^{-14} \text{ [W]} \quad (1)$$

2008.12.3 02:31:51.6JST の宇宙線エコー候補については  $S/N=16$  であったので、  
後方散乱波の強度  $P_r$  として、

$$P_r = 16 \times N_{tot} = 16 \times 6.9 \times 10^{-14} = 1.1 \times 10^{-12} \text{ [W]} \quad (2)$$

を得る。



銀河雑音とシステム内部雑音を合計して、雑音温度を  $T_N = 10^4$  度とする。  
2008.9-2009.2 の MU 観測における受信帯域  $\Delta f$  は 500kHz であったので、雑音  
強度  $N$  は

$$N = k_B T_N \Delta f = 1.38 \times 10^{-23} \times 10^4 \times 5 \times 10^5 = 6.9 \times 10^{-14} \text{ [W]} \quad (1)$$

2008.12.3 02:31:51.6JST の宇宙線エコー候補については  $S/N=16$  であったので、  
後方散乱波の強度  $P_r$  として、

$$P_r = 16 \times N_{tot} = 16 \times 6.9 \times 10^{-14} = 1.1 \times 10^{-12} \text{ [W]} \quad (2)$$

を得る。

# レーダー方程式

後方散乱波の電力  $P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_b P_t G_t G_r \quad [\text{W}]$

ただし、

$\lambda$ :	波長	6.4 m
$R$ :	レンジ(レーダー、EAS間距離)	$24 \pm 4.8 \text{ km} \quad \dots \quad R = 24 \times 10^3 R_{24} \text{ m}$
$\sigma_b$ :	radar cross section (後方散乱断面積)	と書いておく
$P_t$ :	送信電力	1MW ( $R_{24}=0.8\sim 1.2$ )
$G_t$ :	送信アンテナ利得	$\sim 1$
$G_r$ :	受信アンテナ利得	$\sim 137$

$\lambda$ 、 $R$ 、 $P_t$ 、 $G_t$ 、 $G_r$ に値を代入して、 $P_r = 8.5 \times 10^{-12} R_{24}^{-4} \sigma_b \quad [\text{W}]$

一方、観測値より、 $P_r = 1.1 \times 10^{-12} \text{ W}$ を用いて、

$$\sigma_b = 0.129 R_{24}^4 \quad [\text{m}^2]$$

を得る。

# レーダー方程式

後方散乱波の電力  $P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_b P_t G_t G_r \quad [\text{W}]$

ただし、

$\lambda$ : 波長 6.4 m

$R$ : レンジ(レーダー、EAS間距離)  $24 \pm 4.8 \text{ km} \dots R = 24 \times 10^3 R_{24} \text{ m}$

$\sigma_b$ : radar cross section (後方散乱断面積) と書いておく

$P_t$ : 送信電力 1MW ( $R_{24}=0.8\sim 1.2$ )

$G_t$ : 送信アンテナ利得  $\sim 1$

$G_r$ : 受信アンテナ利得  $\sim 137$

$\lambda$ 、 $R$ 、 $P_t$ 、 $G_t$ 、 $G_r$ に値を代入して、 $P_r = 8.5 \times 10^{-12} R_{24}^{-4} \sigma_b \quad [\text{W}]$

一方、観測値より、 $P_r = 1.1 \times 10^{-12} \text{ W}$ を用いて、

$$\sigma_b = 0.129 R_{24}^4 \quad [\text{m}^2]$$

を得る。

# レーダー方程式

後方散乱波の電力  $P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_b P_t G_t G_r \quad [\text{W}]$

ただし、

$\lambda$ : 波長 6.4 m

$R$ : レンジ(レーダー、EAS間距離)  $24 \pm 4.8 \text{ km} \dots R = 24 \times 10^3 R_{24} \text{ m}$

$\sigma_b$ : radar cross section (後方散乱断面積) と書いておく

$P_t$ : 送信電力 1MW ( $R_{24}=0.8\sim 1.2$ )

$G_t$ : 送信アンテナ利得  $\sim 1$

$G_r$ : 受信アンテナ利得  $\sim 137$

$\lambda$ 、 $R$ 、 $P_t$ 、 $G_t$ 、 $G_r$ に値を代入して、 $P_r = 8.5 \times 10^{-12} R_{24}^{-4} \sigma_b \quad [\text{W}]$

一方、観測値より、 $P_r = 1.1 \times 10^{-12} \text{ W}$ を用いて、

$$\sigma_b = 0.129 R_{24}^4 \quad [\text{m}^2]$$

を得る。



# レーダー方程式

後方散乱波の電力  $P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_b P_t G_t G_r \quad [\text{W}]$

ただし、

$\lambda$ : 波長 6.4 m

$R$ : レンジ(レーダー、EAS間距離)  $24 \pm 4.8 \text{ km} \dots R = 24 \times 10^3 R_{24} \text{ m}$

$\sigma_b$ : radar cross section (後方散乱断面積) と書いておく

$P_t$ : 送信電力 1MW ( $R_{24}=0.8\sim 1.2$ )

$G_t$ : 送信アンテナ利得  $\sim 1$

$G_r$ : 受信アンテナ利得  $\sim 137$

$\lambda$ 、 $R$ 、 $P_t$ 、 $G_t$ 、 $G_r$ に値を代入して、 $P_r = 8.5 \times 10^{-12} R_{24}^{-4} \sigma_b \quad [\text{W}]$

一方、観測値より、 $P_r = 1.1 \times 10^{-12} \text{ W}$ を用いて、

$$\sigma_b = 0.129 R_{24}^4 \quad [\text{m}^2]$$

を得る。

# レーダー方程式

後方散乱波の電力  $P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_b P_t G_t G_r \quad [\text{W}]$

ただし、

$\lambda$ : 波長 6.4 m

$R$ : レンジ(レーダー、EAS間距離)  $24 \pm 4.8 \text{ km} \dots R = 24 \times 10^3 R_{24} \text{ m}$

$\sigma_b$ : radar cross section (後方散乱断面積) と書いておく

$P_t$ : 送信電力 1MW ( $R_{24}=0.8\sim 1.2$ )

$G_t$ : 送信アンテナ利得  $\sim 1$

$G_r$ : 受信アンテナ利得  $\sim 137$

$\lambda$ 、 $R$ 、 $P_t$ 、 $G_t$ 、 $G_r$ に値を代入して、 $P_r = 8.5 \times 10^{-12} R_{24}^{-4} \sigma_b \quad [\text{W}]$

一方、観測値より、 $P_r = 1.1 \times 10^{-12} \text{ W}$ を用いて、

$$\sigma_b = 0.129 R_{24}^4 \quad [\text{m}^2]$$

を得る。

# レーダー方程式

後方散乱波の電力  $P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_b P_t G_t G_r \quad [\text{W}]$

ただし、

$\lambda$ : 波長 6.4 m

$R$ : レンジ(レーダー、EAS間距離)  $24 \pm 4.8 \text{ km} \dots R = 24 \times 10^3 R_{24} \text{ m}$

$\sigma_b$ : radar cross section (後方散乱断面積) と書いておく

$P_t$ : 送信電力 1MW ( $R_{24}=0.8\sim 1.2$ )

$G_t$ : 送信アンテナ利得  $\sim 1$

$G_r$ : 受信アンテナ利得  $\sim 137$

$\lambda$ 、 $R$ 、 $P_t$ 、 $G_t$ 、 $G_r$ に値を代入して、 $P_r = 8.5 \times 10^{-12} R_{24}^{-4} \sigma_b \quad [\text{W}]$

一方、観測値より、 $P_r = 1.1 \times 10^{-12} \text{ W}$ を用いて、

$$\sigma_b = 0.129 R_{24}^4 \quad [\text{m}^2]$$

を得る。

宇宙線のエネルギー、EASの構造、電波散乱の幾何条件に依存

# レーダー方程式

後方散乱波の電力  $P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_b P_t G_t G_r \quad [\text{W}]$

ただし、

$\lambda$ : 波長 6.4 m

$R$ : レンジ(レーダー、EAS間距離)  $24 \pm 4.8 \text{ km} \dots R = 24 \times 10^3 R_{24} \text{ m}$

$\sigma_b$ : radar cross section (後方散乱断面積) と書いておく

$P_t$ : 送信電力 1MW ( $R_{24}=0.8\sim 1.2$ )

$G_t$ : 送信アンテナ利得  $\sim 1$

$G_r$ : 受信アンテナ利得  $\sim 137$

$\lambda$ 、 $R$ 、 $P_t$ 、 $G_t$ 、 $G_r$ に値を代入して、 $P_r = 8.5 \times 10^{-12} R_{24}^{-4} \sigma_b \quad [\text{W}]$

一方、観測値より、 $P_r = 1.1 \times 10^{-12} \text{ W}$ を用いて、

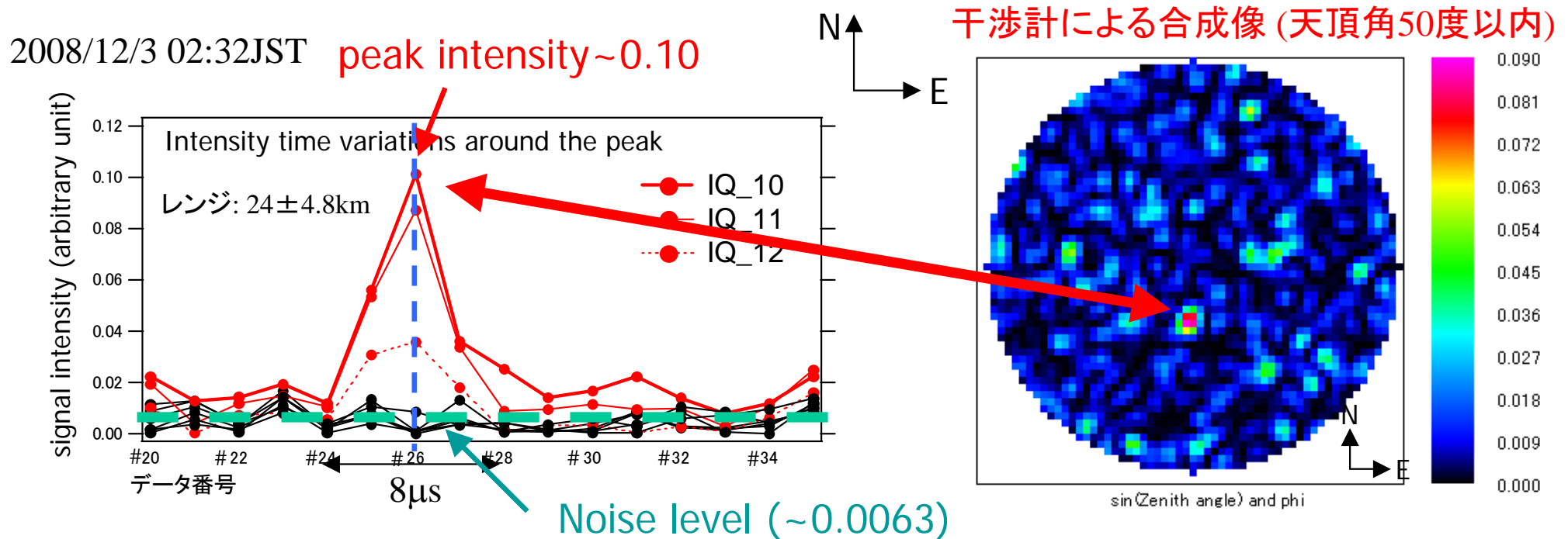
$$\sigma_b = 0.129 R_{24}^4 \quad [\text{m}^2]$$

を得る。

宇宙線のエネルギー、EASの構造、電波散乱の幾何条件に依存

→Gorhamの計算例と比較して宇宙線エネルギーを $10^{18} \text{ eV}$ 程度と推定したが、期待されるエコーの頻度から考えて少しエネルギーが高すぎる。  
まだ、エネルギー推定には1桁程度の不定性があり、今後の検討が必要。

## 見いだした宇宙線エコー候補 (一番S/Nのよい例)



今後のMU観測(3月)で改良する予定の点

○時間分解能を上げる( $\Delta t = 2\mu\text{秒} \rightarrow 1\mu\text{秒}$ )

○単に $\Delta t \downarrow$ ではS/Nが低下するので、同時に送信ビームを絞る(3.6度は絞りすぎなので、18度程度に)

○受信時に475本全てのアンテナを使う(昨年度は25本のみ)



MUの観測は宇宙線EASエコーの存在証明が目的。次の段階をどうするか？

MUの観測は宇宙線EASエコーの存在証明が目的。次の段階をどうするか？

→MU単体では、エコーの位置を決めうるだけで、宇宙線の到来方向は判らない。

MUの観測は宇宙線EASエコーの存在証明が目的。次の段階をどうするか？

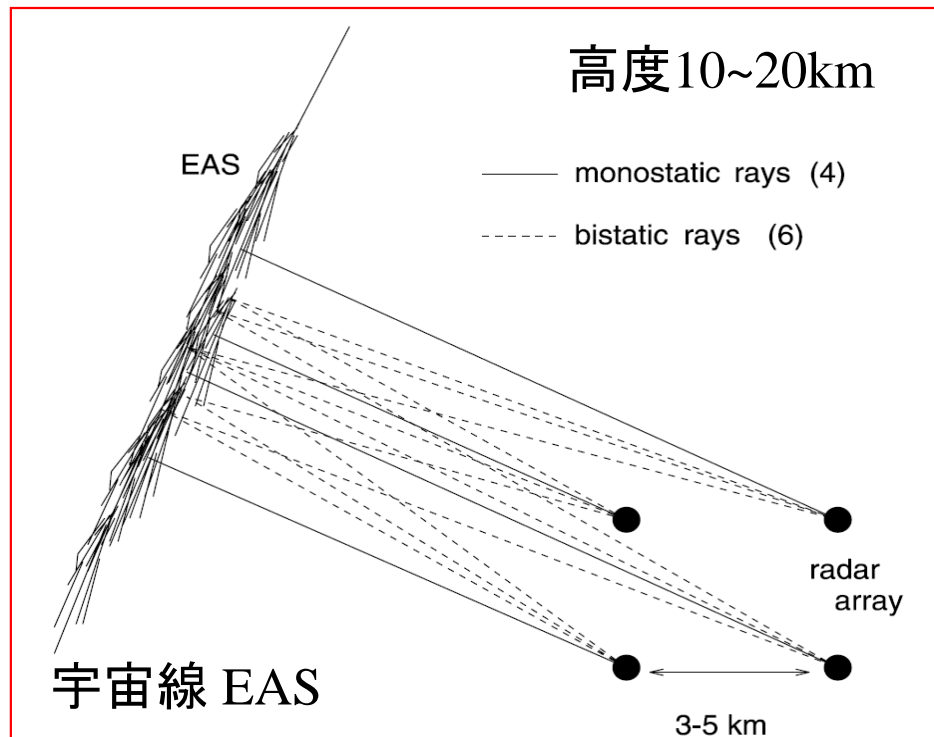
→MU単体では、エコーの位置を決めうるだけで、宇宙線の到来方向は判らない。

複数の送受信点で観測し時間差を計測すれば場所と方向が決まる(筈)←流星観測で実用化されている方法の応用

MUの観測は宇宙線EASエコーの存在証明が目的。次の段階をどうするか？

→MU単体では、エコーの位置を決めうるだけで、宇宙線の到来方向は判らない。

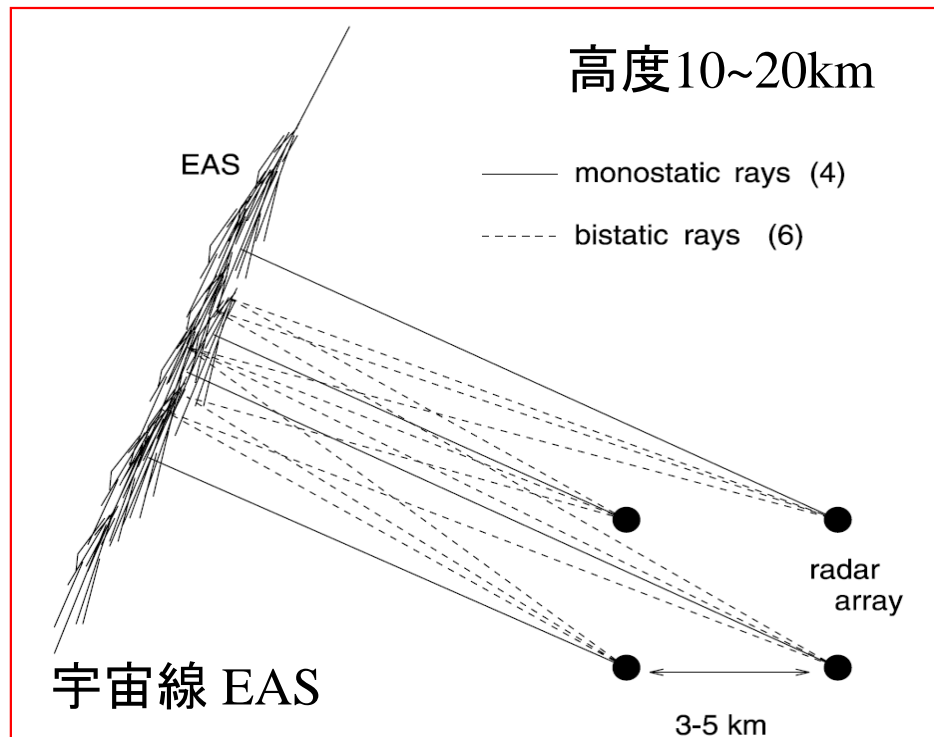
複数の送受信点で観測し時間差を計測すれば場所と方向が決まる(筈)←流星観測で実用化されている方法の応用



MUの観測は宇宙線EASエコーの存在証明が目的。次の段階をどうするか？

→MU単体では、エコーの位置を決めうるだけで、宇宙線の到来方向は判らない。

複数の送受信点で観測し時間差を計測すれば場所と方向が決まる(筈)←流星観測で実用化されている方法の応用



電波の経路による到着時刻差



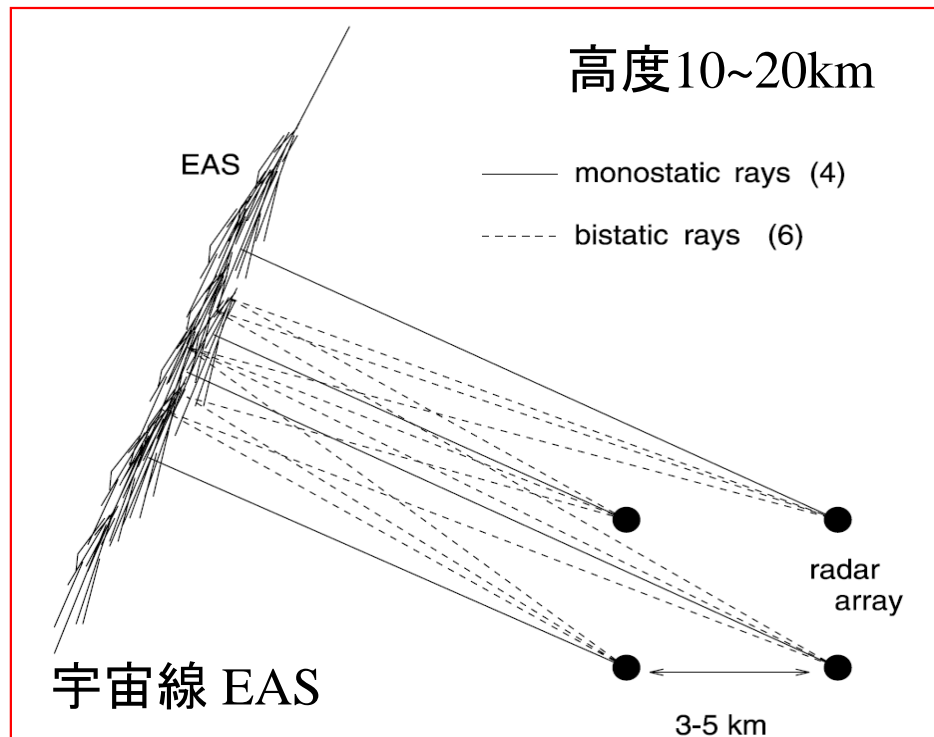
到来方向の決定



MUの観測は宇宙線EASエコーの存在証明が目的。次の段階をどうするか？

→MU単体では、エコーの位置を決めうるだけで、宇宙線の到来方向は判らない。

複数の送受信点で観測し時間差を計測すれば場所と方向が決まる(筈)←流星観測で実用化されている方法の応用



電波の経路による到着時刻差



到来方向の決定

流星電波観測の学生実習:  
この原理の体験をさせた

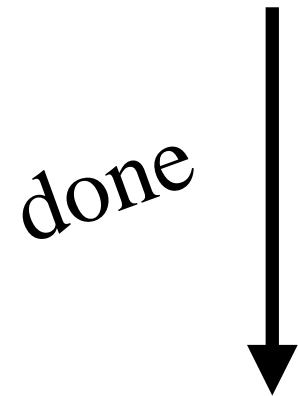
# 目次

1. Introduction
2. 宇宙線のさまざまな電波観測手段
3. レーダー法の原理
4. 京大信楽MUレーダー概要
5. 宇宙線エコー候補  
その同定と強度推定

---

## 6. レーダー法と制動輻射受信法

付録: レーダー法学生実習  
(駒場 全学体験セミナー)



## 宇宙線の電波的観測

### • 空気シャワーそのものが発生する電波

Askaryan effect (氷、岩塩などの媒質中でのチェレンコフ効果)

- Askaryan effect が測定された(D. Saltzberg et al PRL 86 (2001) 2802)
- 大気中ではその他の電波が優勢
- 入射一次宇宙線エネルギーの2乗に比例した電波強度をもち  
一次宇宙線が高エネルギーになるほど有望になる
- 電波に対して透明な物質(氷、岩塩、月面)がターゲットとなる
- FORTE, RICE, SALSA, GLUE, .....

### • 空気シャワー粒子が地磁気に巻きついてシンクロトン放射 (巻きつくといっても1/4周程度)

Geo-synchotron radiation

- 大気中では Askaryan effect よりも優勢
- 近年シミュレーターが整備されてきた
- LOFAR (プロトタイプ LOPES 1-32MHz, 4MHz 毎)

### • 空気シャワー粒子の制動放射によって生じる電波

Microwave Molecular Bremsstrahlung Radiation (MBR)

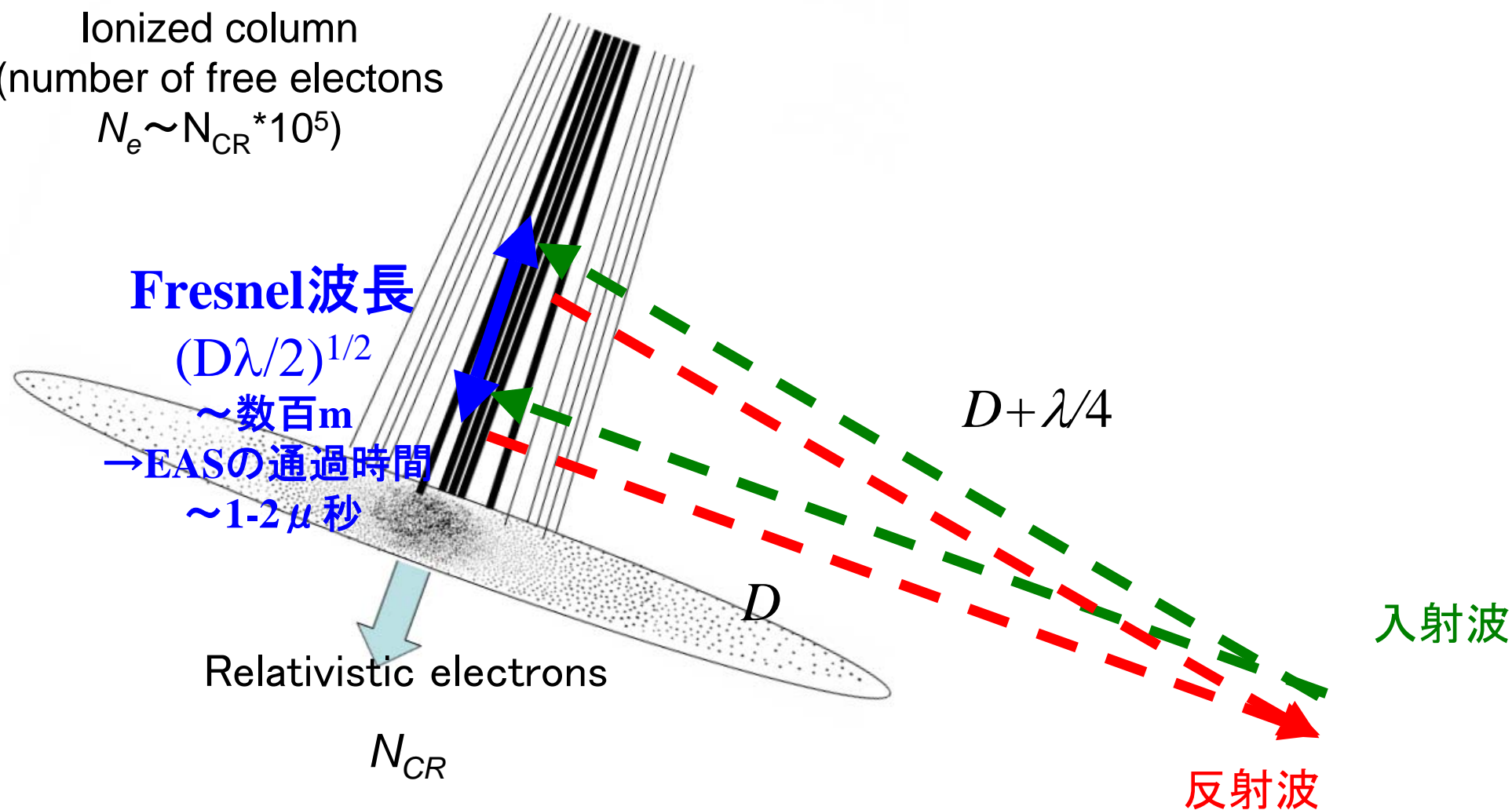
### • RADAR による宇宙線観測

## Fresnel波長について

EAS後部にできた自由電子柱によるコヒーレント散乱の条件

EAS axis  $\perp$  propagation direction  
 $N_e$

Ionized column  
(number of free electrons  
 $N_e \sim N_{CR} * 10^5$ )



# Fresnel波長について

EAS後部にできた自由電子柱によるコヒーレント散乱の条件

EAS axis  $\perp$  propagation direction  
 $N_e$

Ionized column  
(number of free electrons  
 $N_e \sim N_{CR} * 10^5$ )

**Fresnel波長**

$$(D\lambda/2)^{1/2}$$

～数百m

→EASの通過時間

～1-2  $\mu$ 秒

Relativistic electrons

$N_{CR}$

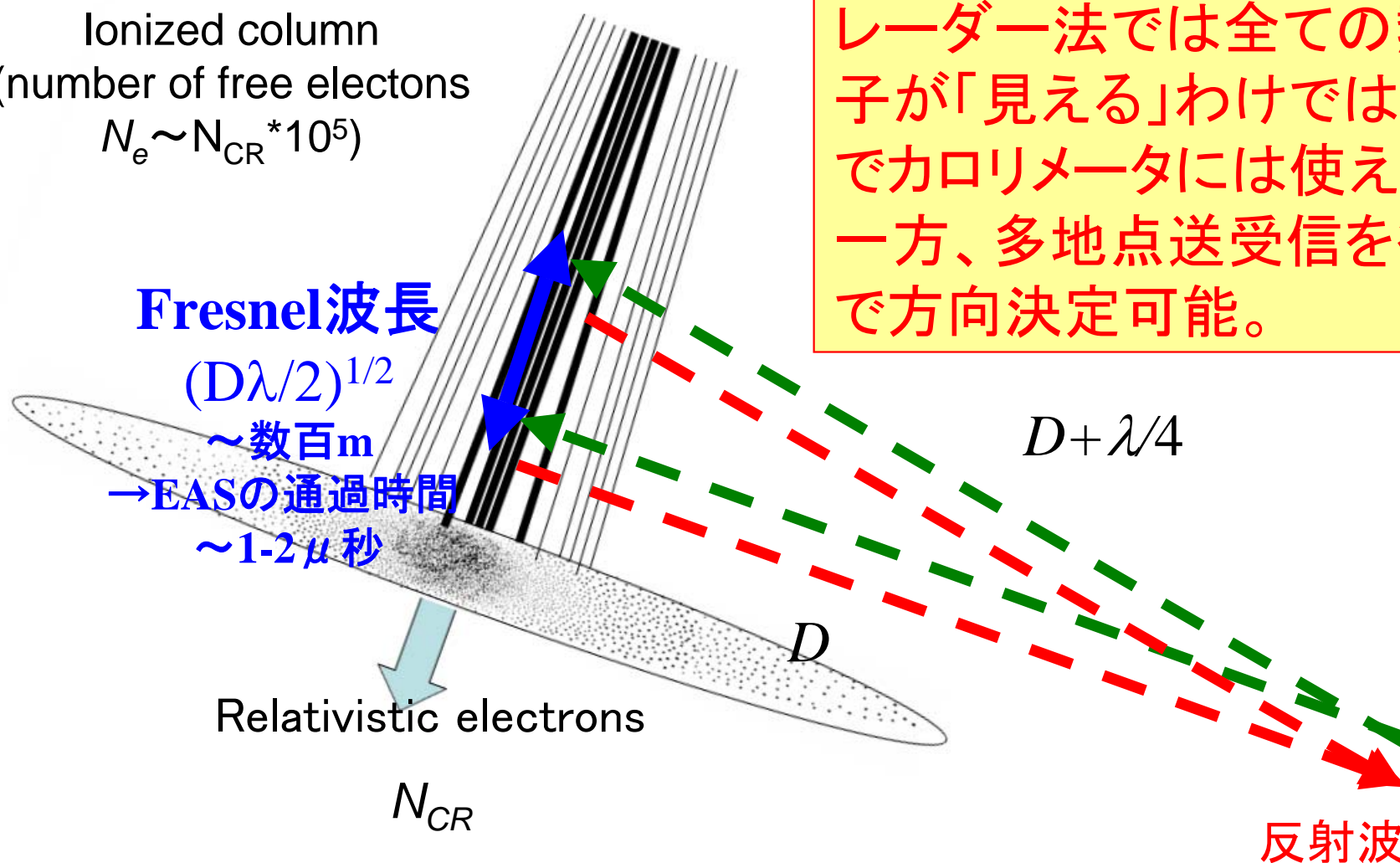
レーダー法では全ての熱的電子が「見える」わけではないのでカロリメータには使えない。  
一方、多地点送受信を行うことで方向決定可能。

$D + \lambda/4$

$D$

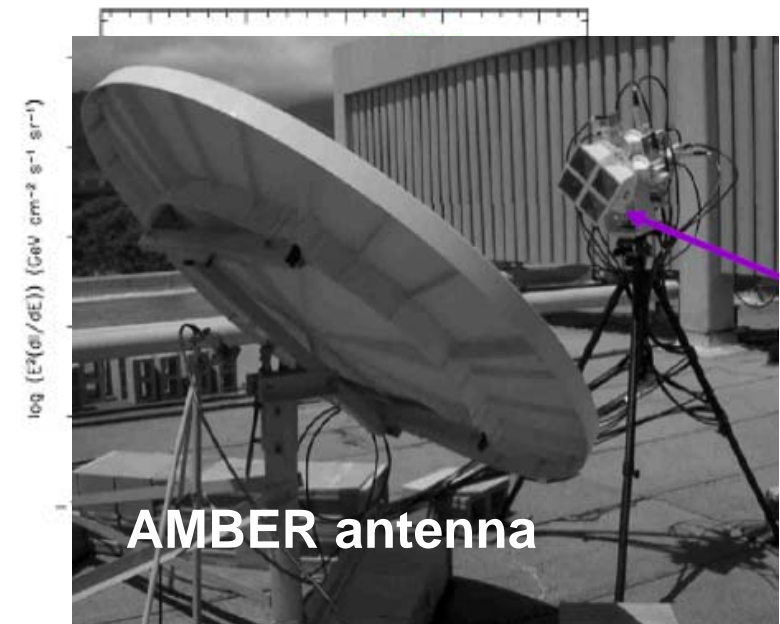
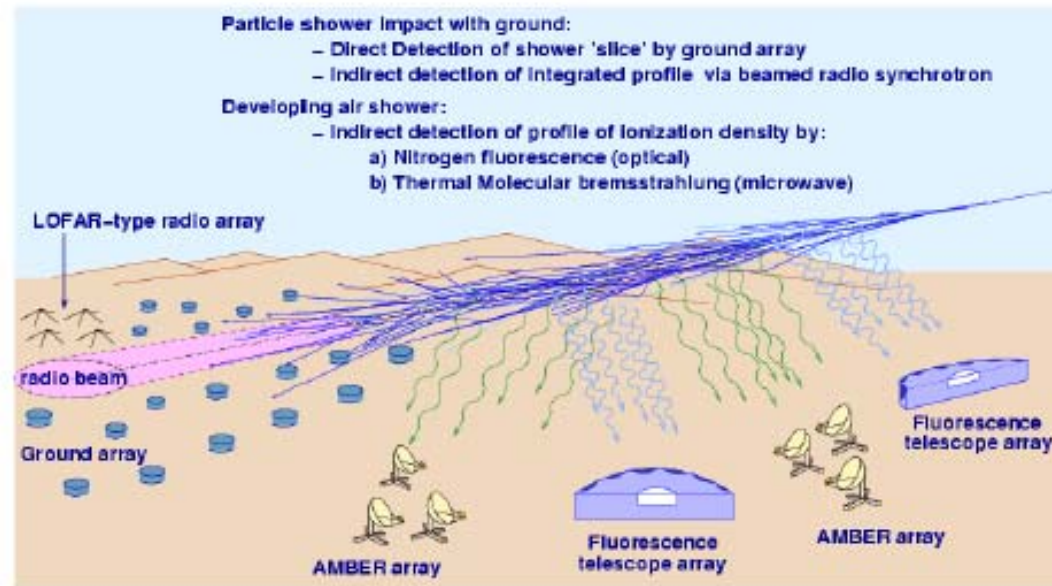
入射波

反射波





## Microwave bremsstrahlung detection of UHECR



- "Radio fluorescence" detection of UHECR air showers
- Could provide 100% duty-cycle alternative to N<sub>2</sub> fluorescence detection (<10% duty cycle typical)
- Two accelerator experiments: Argonne Wakefield Accelerator (2003) & SLAC-T471 (summer 2004) indicate stronger-than-expected microwave emission for 20-50ns after shower passage

TA, AugerにおけるFluorescence光観測と類似  
→全ての準熱的電子が「見える」が、方向決定精度が悪い(だろう)

## 宇宙線の電波的観測

### • 空気シャワーそのものが発生する電波

Askaryan effect (氷、岩塩などの媒質中でのチェレンコフ効果)

- Askaryan effect が測定された(D. Saltzberg et al PRL 86 (2001) 2802)
- 大気中ではその他の電波が優勢
- 入射一次宇宙線エネルギーの2乗に比例した電波強度をもち  
一次宇宙線が高エネルギーになるほど有望になる
- 電波に対して透明な物質(氷、岩塩、月面)がターゲットとなる
- FORTE, RICE, SALSA, GLUE, .....

### • 空気シャワー粒子が地磁気に巻きついてシンクロトン放射 (巻きつくといっても1/4周程度)

Geo-synchotron radiation

- 大気中では Askaryan effect よりも優勢
- 近年シミュレーターが整備されてきた
- LOFAR (プロトタイプ LOPES 1-32MHz, 4MHz 毎)

2つを組み合わせる  
のがよい?

### • 空気シャワー粒子の制動放射によって生じる電波

Microwave Molecular Bremsstrahlung Radiation (MBR)

### • RADAR による宇宙線観測

# 目次

1. Introduction
2. 宇宙線のさまざまな電波観測手段
3. レーダー法の原理
4. 京大信楽MUレーダー概要
5. 宇宙線エコー候補  
その同定と強度推定
6. レーダー法と制動輻射受信法

付録: レーダー法学生実習  
(駒場 全学体験セミナー)

➡ 別ファイル化(ppt)