

VLBI懇談会シンポジウム
2017/12/23-24 @ 帝京科学大学

短時間変動を検出する VLBI観測システム構想

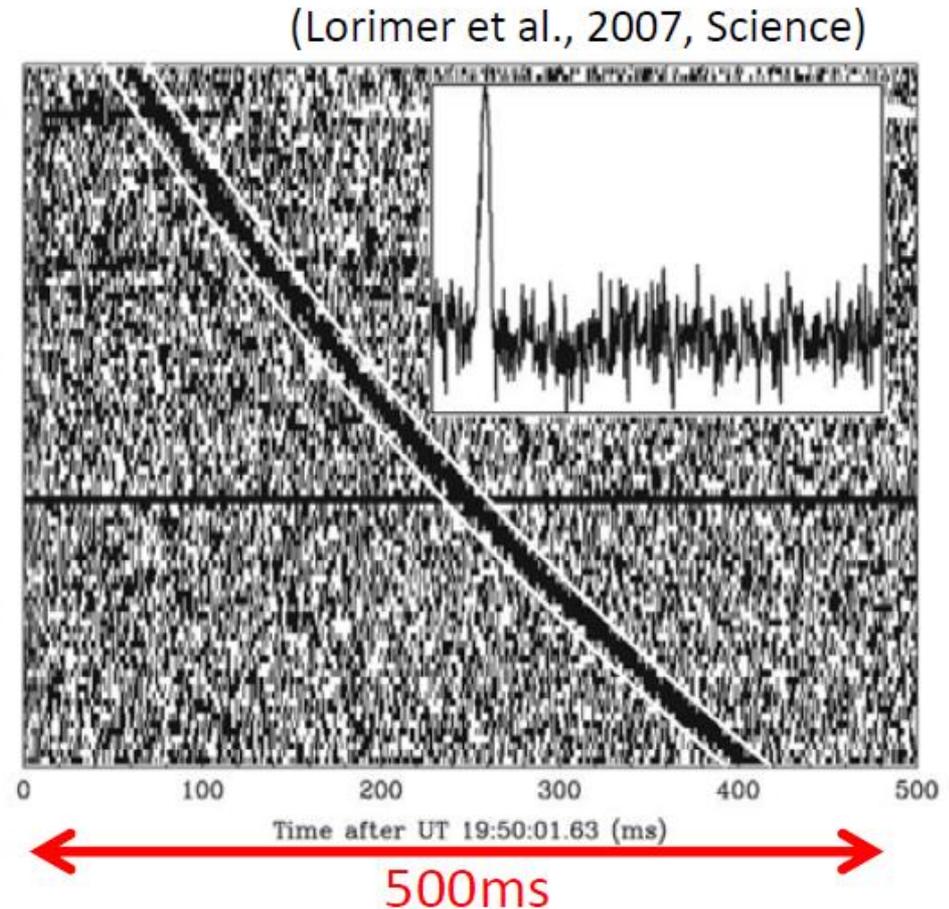
藤沢健太
(山口大学)

短時間変動現象の天文学

- 宇宙物理学がまだ十分に扱っていない研究対象
 - 人類に新しい宇宙像を見せてくれる可能性が高い
- 短時間強度変動現象の研究例 ($\tau \leq 1$ day)
 - FRB (Fast Radio Burst)
 - 新沼バースト
 - パルサーのジャイアントパルス、ナノショット
 - GRB (Gamma-Ray Burst)
 - 重力波源対応天体
 - その他(未知の天体)

FRB (Fast Radio Burst)

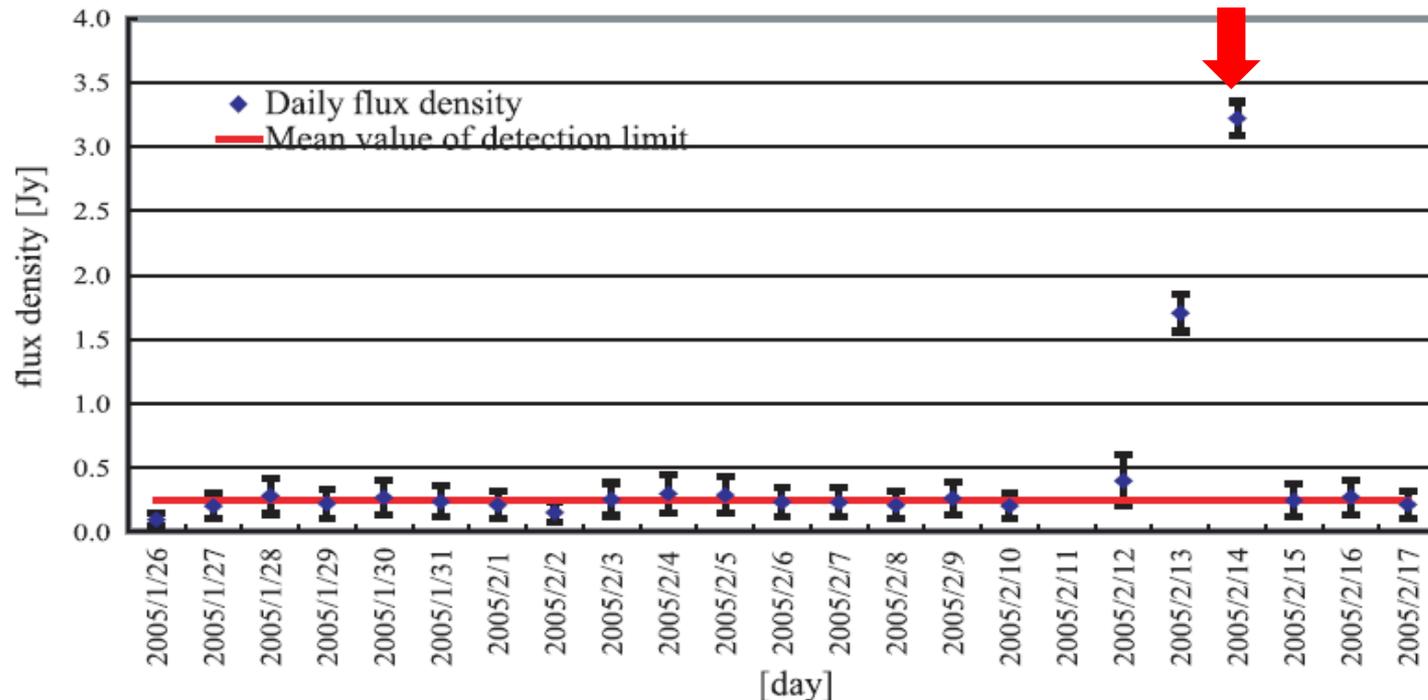
- 数ミリ秒、1 Jy程度の短いパルスが1発届く
 - いつどこに発生するかわからない
- 正体不明
 - DMの大きさから、宇宙論的距離にあるらしい
- これまで約20回検出
- 最近、VLBIで位置決定報告
 - ただしリピートする唯一のFRBの観測



FRBの最初の観測結果 (Lorimer burstと呼ばれる)
Parkes 64m のアーカイブデータの解析によって発見された

新沼バースト

Radio Transient WJN J1443+3439



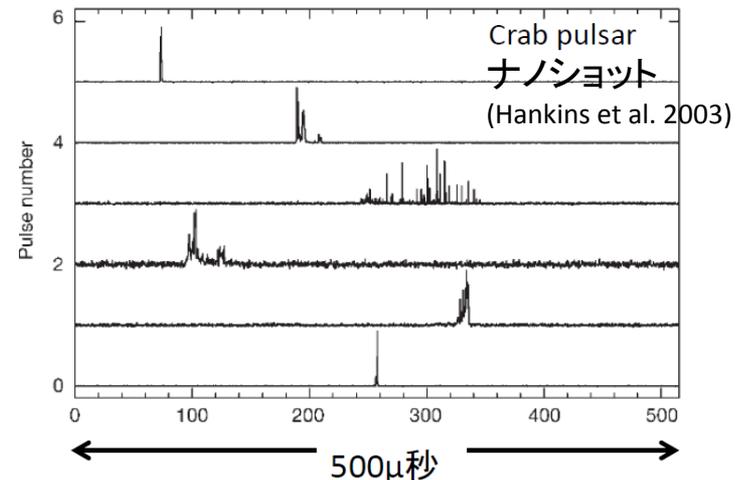
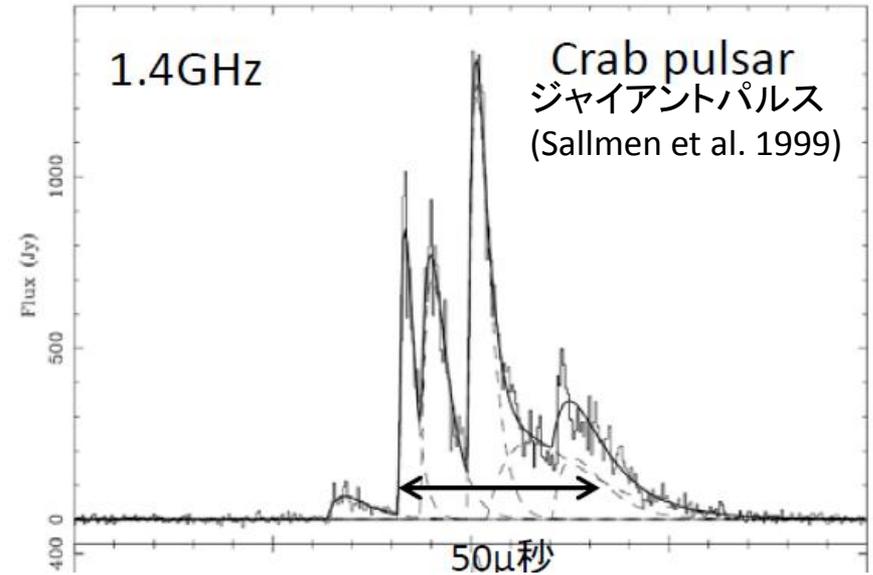
- Niinuma et al. (2007) で初めて報告された
 - 早稲田大学の干渉計による観測
 - 2日間にわたって観測された、3 Jyに達するバースト現象
- 正体不明
- FRBに対して、Slow Burstと呼ばれることがある
- FRBに対して、あまり研究されていない(研究例: Stewart et al. 2016)

↔
2日

ジャイアントパルス、ナノショット

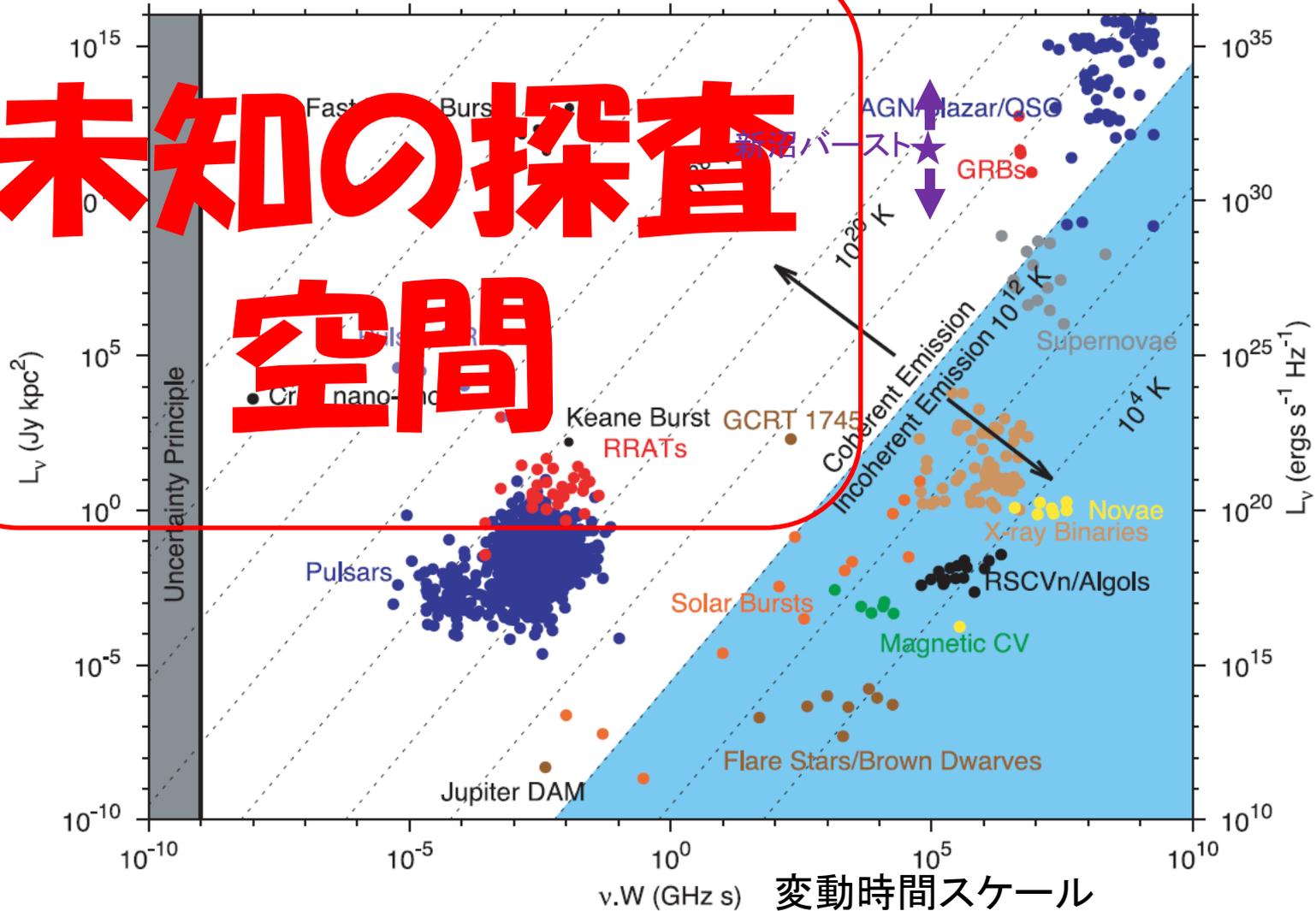
- ジャイアントパルス
 - かにパルサーは、低頻度ながら1000 Jyを超える強力なパルスを出すことがある
- ナノショット
 - 1 nsec程度の短い時間変動を示すこともある

このような現象は、他には知られていない。発生機構も不明



ごく短時間変動の放射機構

未知の探査空間



未知の探査空間に、未知の天体、未知の放射機構がある

短時間変動の研究

- 宇宙の新しい側面を見ることができる
 - 新しい種類の天体が見つかる
 - 変動を手掛かりに物理的な理解ができる
 - FRB、GRB、ブラックホール、超新星、連星合体、爆発現象、重力波現象・・・コンパクトで激しい現象が多い
- なぜ今まで研究が十分に発達していないのか？

1. 望遠鏡の視野の狭さ
2. 位置決定の難しさ

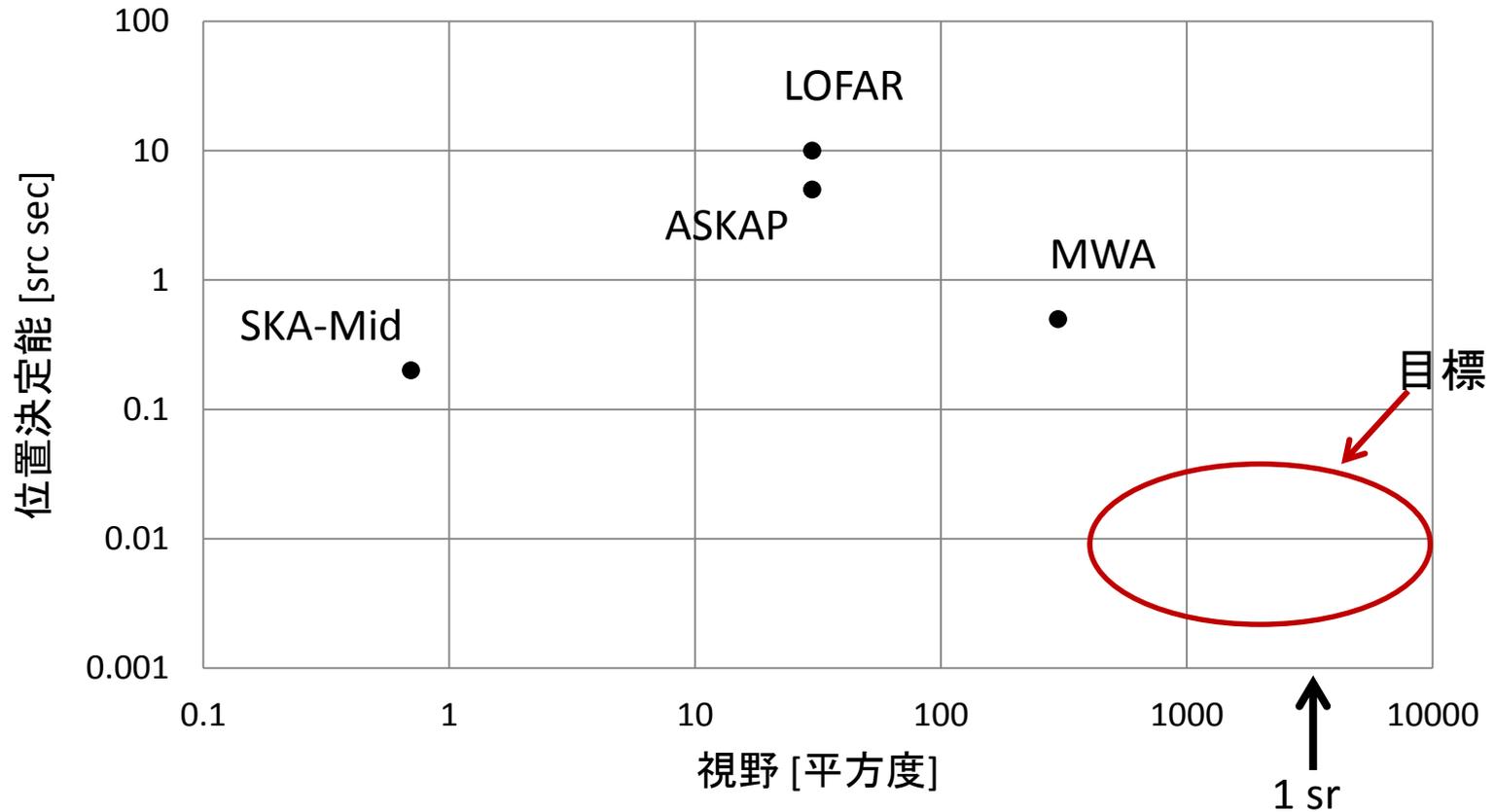


広視野
VLBI

望遠鏡は視野が狭い

- 「管を通して空を見る」
 - FRBは1000発／日なのに、これまで約20個の観測例しかない
 - 我々は細い管を通して宇宙を見ている。あちこちで起きている面白い現象に気付いていない
- 広視野望遠鏡(光・赤外線)
 - Suprime-Cam 視野 0.5°
 - HSC 視野 1.5°
 - LSST 視野 3°
 - Pan-STARRS 視野 3° ……変動天体のモニター

広視野・精密位置決定望遠鏡



短時間で変動・出現する現象を、より広い視野、より高い空間分解能で検出する望遠鏡を作ろう

広視野・精密位置望遠鏡の要求性能

FRBを1日に100発検出し、位置を10 masで決定する

(NS-NS, NS-BHイベントで発生する電波放射との感度比較を行いたい)

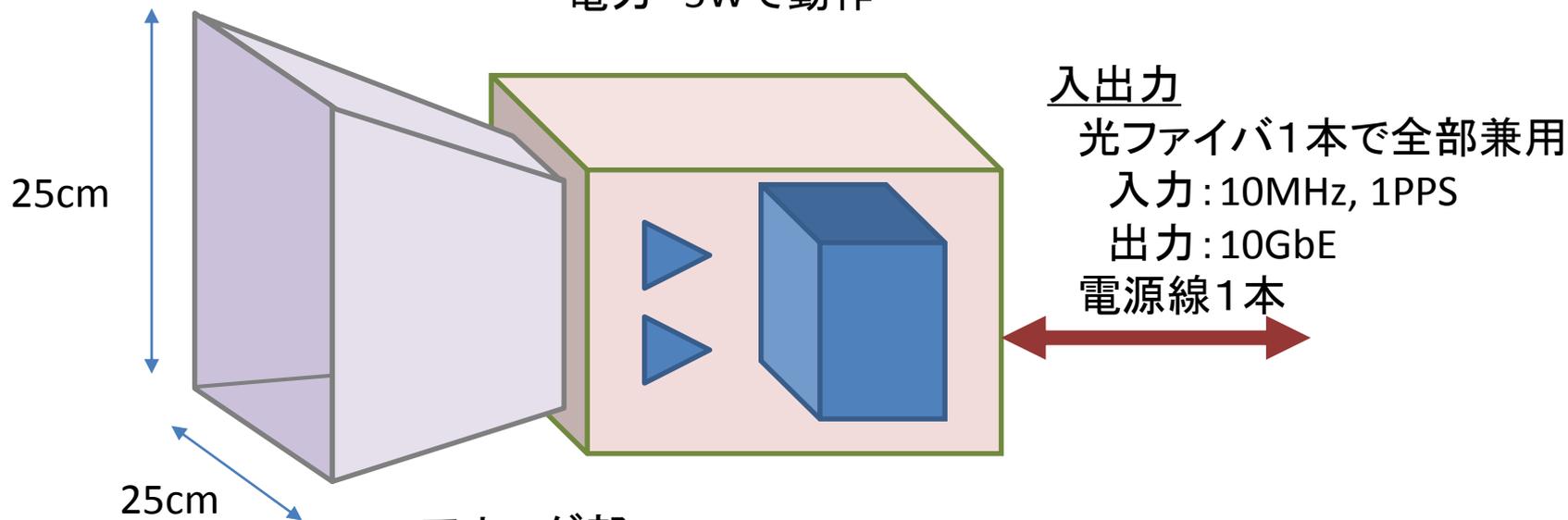
項目	値	特記事項
視野	1 sr	全天の1/10
分解能(位置決定精度)	10 mas	距離1 Gpcで50 pcに相当
時間分解能	1 nsec	ナノショットをとらえる
感度	Parkes 64m と同等	FRBを高感度で観測



①受信モジュール、②アレイ・多ビーム化、③VLBI化、という3ステップで構築

① 受信モジュール

価格 4万円
電力 5Wで動作



ビームサイズ
~ 1 rad

アナログ部

$F = 1.0-1.5 \text{ GHz}$
 $T_{\text{sys}} = 30 \text{ K}$
常温アンプ
2偏波
ゲイン 90dB

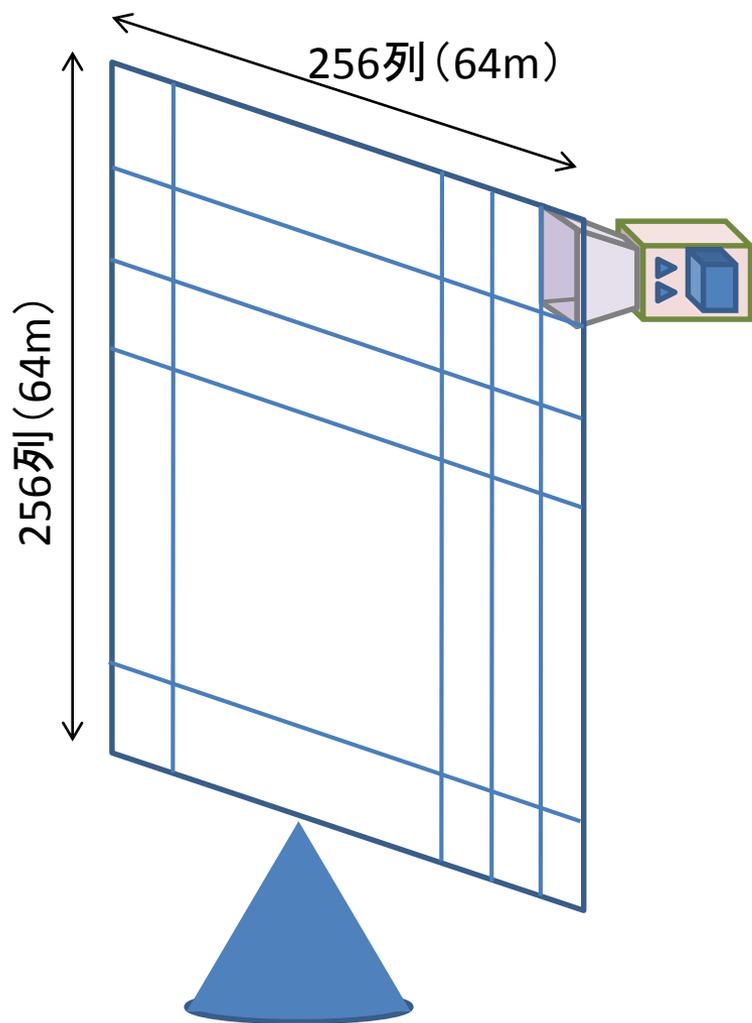
デジタル部

フィルタ、サンプラ、フォーマッタ
1Gsample/sec, 4bit, 2polarization
合計 8Gbps/モジュール

入出力

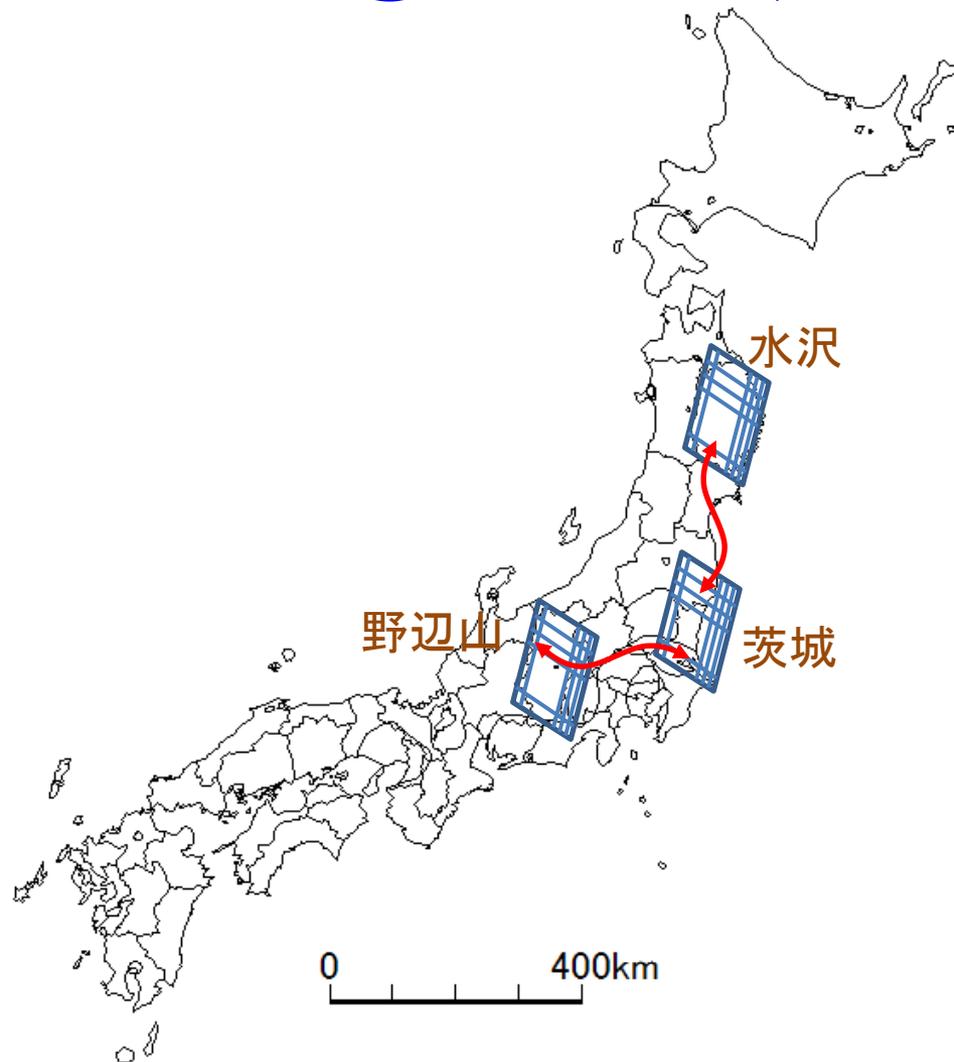
光ファイバ1本で全部兼用
入力: 10MHz, 1PPS
出力: 10GbE
電源線1本

② アレイ望遠鏡



- アレイ望遠鏡構築
 - $256 \times 256 = 65536$ 個の受信モジュールを並べる
 - $64\text{m} \times 64\text{m}$ でParkesよりやや大きい
- 価格 50億円
 - 受信部 26億円
 - 架台他 18億円
 - データ処理部 6億円
- 消費電力 330kW

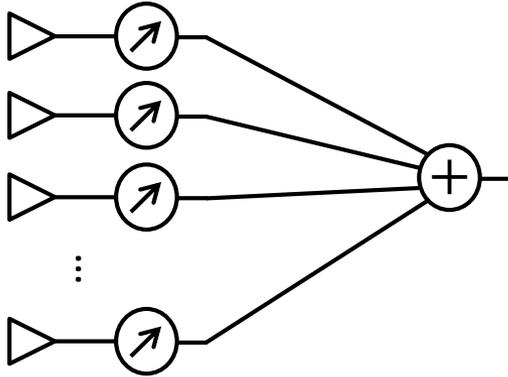
③ 望遠鏡を3か所に配置



- VLBI観測網化
 - 数百km以上離れた適当な3か所
 - たとえば水沢、茨城、野辺山
 - 基線長200-400km
 - ネットワークで結合
- 価格 170億円
 - 50億円×3台+ネットワーク・中央処理部・他

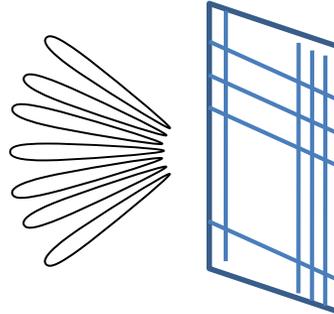
観測方法

① ビーム形成



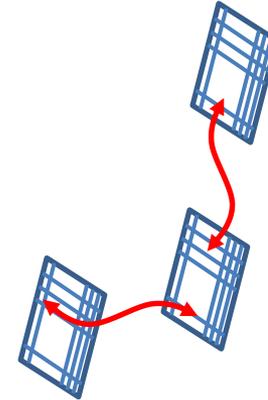
- 位相と遅延を変えつつ、各モジュールの信号の和を取り単一ビームを形成(※後述)
- これでParkes 64mと同等の性能となる
- $1\sigma \sim 1 \text{ mJy}$ ($\tau=1 \text{ sec}$)
- $5\sigma \sim 0.1 \text{ mJy}$ ($\tau=2500 \text{ sec}$)

② 多ビーム化



- ①の処理を並列化すると、いくらでもビームを作れる
- 1 srのプライマリビームを埋めるようにナイキストレートで $256 \times 256 = 65536$ 個のビームを形成
- これで1 srを同時観測可能になる

③ VLBI化



- 各々のビームでVLBI観測をする
- 水沢-茨城-野辺山基線では、FRINGE間隔は100 mas程度だが、S/Nが高ければ10 masで位置決定可能となる
- 研究対象はコンパクト天体なので、VLBI可能
- 視野内に多数の天体があるので位相補償も常時可能

空間FFTを利用

技術的課題

① 受信モジュール開発

- Q: $T_{\text{sys}} = 30 \text{ K}$ 、1台 4万円は可能か？
- A: 初期投資・大量生産で突破する。開発費として30億円を投資し、約20万個製作することで価格低下をはかる。

【参考】

- BS受信機は $T_{\text{sys}} \sim 100 \text{ K}$ @12GHz、1万円
- 川越無線のLNA: $F=1.4\text{-}1.6 \text{ GHz}$, $NF=0.2\text{dB}$ ($\text{Trx}=14\text{K}$), 43,000円

② データ処理の膨大さ

- Q: 単純処理ではデータが膨大過ぎる。
- A: 稠密アレイの空間FFT(大師堂)を利用して解決。
- 単純処理
 - $8\text{Gbps} \times 2^{16}\text{モジュール} \times 2^{16}\text{ビーム}$
~毎秒 10^{19} 処理が必要
- 改良処理法
 - ①モジュール出力を 2^{16} 点時間FFT
 - ②アレイ上で 2^{16} 点の空間FFT
 - これで多ビームを形成(maximum redundant arrayの利点)
 - 処理量は $2^{16} \rightarrow \log(2^{16})$ 倍に低減

信号処理案

- 手順
 - 各モジュールの出力信号を、一定長の時系列データに分割して時間FFTする
 - そのデータを空間FFTする
- メリット
 - 広い帯域(\sim GHz)で、斜め入射の信号の観測が可能になる(FFT=分光することで実効的な周波数帯域を下げる)
- デメリット
 - 各モジュールでFFTをするため、信号処理が膨大

SKAとの関係

項目	広視野望遠鏡	SKA-Mid
視野	1 sr	0.0003 sr
分解能・位置決定精度	10 mas (B = 400 km)	10 mas (B = 200 km)
感度	$1\sigma = 1 \text{ mJy}$ ($\tau = 1 \text{ sec}$) $5\sigma = 0.1 \text{ mJy}$ ($\tau = 2500 \text{ sec}$)	$1\sigma = 0.04 \text{ mJy}$ ($\tau = 1 \text{ sec}$)
時間分解能など	同等	

- SKAでも、トランジェントを検出するには視野が狭い
- 広視野望遠鏡でトランジェントを検出し、それをSKAで観測するという方針が良い

広視野望遠鏡で始まる時間領域天文学

- トランジェントの検出
 - FRBの検出(1日に100発)、位置決定、統計、素性の解明
 - Niinuma Burstの探査(未知の世界)
 - パルサーのGiant Pulse
 - 重力波対応天体
- 他の望遠鏡ともVLBI観測できる
- 変動するコンパクト天体のモニター
 - AGN, μ -Quasar, flare star, active binary等、何でも変動天体のモニターが可能
- 全天モニター
 - 2500秒積分で0.1 mJyを検出可能($>5\sigma$)
 - \Rightarrow 1日で全天をモニター観測可能
 - Log N-log S関係、SXDFなどの観測により、0.1 mJy以上のフラックス密度をもつ天体は全天に2500万天体あると推測される。そのうちVLBI可能なコンパクト天体が10%として250万天体。これを毎日モニターする。
 - 興味深い天体や現象が必ず見つかる。銀河系内BHなど

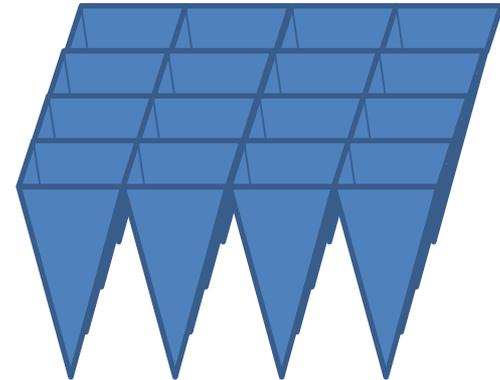
取り組むべき基礎研究

- シミュレーション

- 広視野望遠鏡の信号処理を模擬した計算機シミュレーションを行う
- 早稲田の研究を参照
- 信号処理と解析、キャリアブレーションについて研究

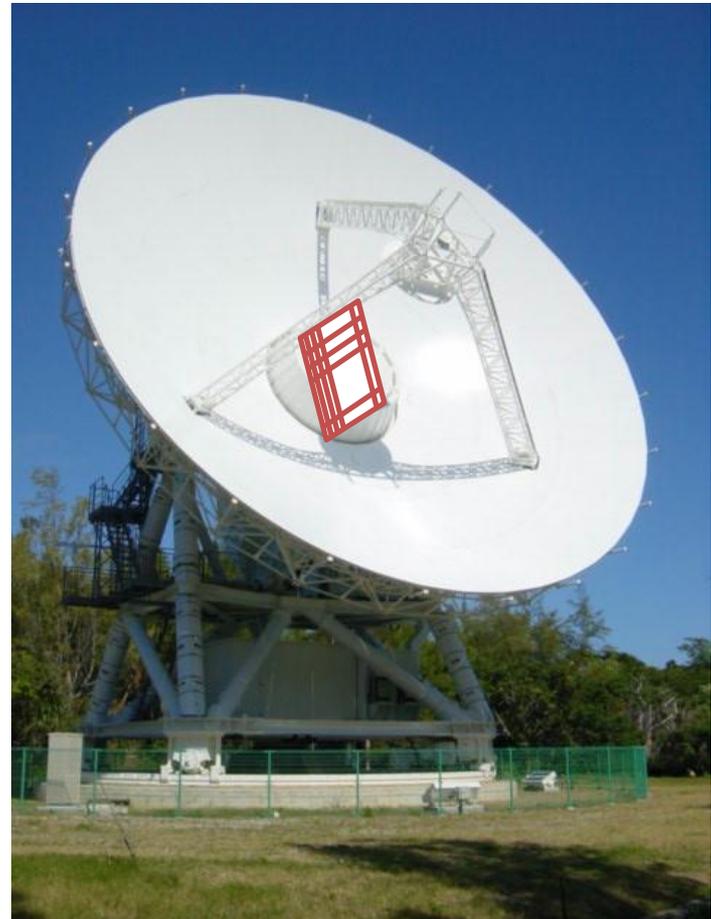
- 基礎実験

- 4(または16)モジュール、狭帯域で試験観測実施
- 現実的な課題を抽出、解決方法を研究



まずVERA(と野辺山)を改造する

- VERA
 - 2ビーム→1024ビーム
 - 焦点面を32x32受信モジュールで充填
 - 多ビーム(ϕ -アレイでない)
 - 視野回転台が好都合
 - 視野直径2度
 - FRBは10日に1回、視野内で発生
 - 常温・22-44GHz同時受信
 - VERAの資産を活かす



宇宙電波懇談会シンポジウムで発表 したら・・・

- I氏「20億円で作れませんかね」
 - H氏「10億円ぐらいなら考える余地が・・・」
 - 価格低下の案
 - 駆動部を無くす
 - ビーム数を16分の1にする(視野も1/16に)
- 25億円/1台