

SKAによる突発天体

1. SKAによる突発天体～サイエンスブックより～
2. 直線偏波FRBを用いた宇宙大規模構造の探査
3. SKAのスペックと開発提案

赤堀卓也

国立天文台水沢VLBI観測所

日本SKAパルサー・突発天体研究会

2018/1/5-7@ホテルがんげ

SKA-JP突発天体科学検討班

❖ 代表：新沼浩太郎

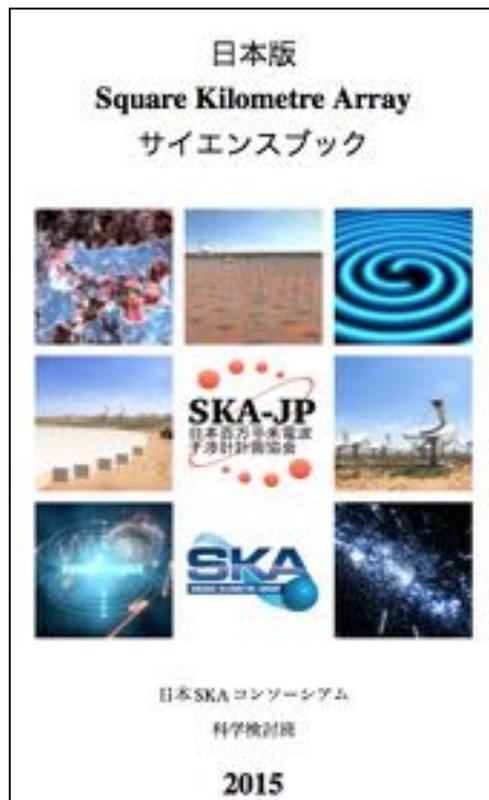
- (代理) 青木貴弘
- (代理の代理?) 赤堀

❖ 毎月のスカイプ会議

- 2014年9月発足, 19回

❖ 主な活動

- SKA科学事例検討
 - サイエンスブック
 - 成功基準
- 研究論文紹介
 - FRBの観測報告とか
- 共同研究の検討
 - 観測プロポーザルとか



http://ska-jp.org/ws2015/SKA-JP/talks/SKAJP_Science_Book_2015.pdf

名前	所属
青木 貴弘	山口大学
赤堀 卓也	鹿児島大学
新沼 浩太郎	山口大学
端山 和大	大阪市立大学
高橋 慶太郎	熊本大学
亀谷 收	国立天文台
寺澤 敏夫	東京大学
三上 諒	東京大学
榎戸 輝揚	京都大学
井上 進	Max-Planck-Institute for Physics
長瀬 重博	理化学研究所
前田 啓一	京都大学
浦田裕次	国立中央大学 (台湾)
伊藤裕貴	理化学研究所
岩井一正	NICT
Lee Shiu-Hang (Herman)	JAXA
柴田一成	京都大学
戸谷友則	東京大学
本間希樹	国立天文台

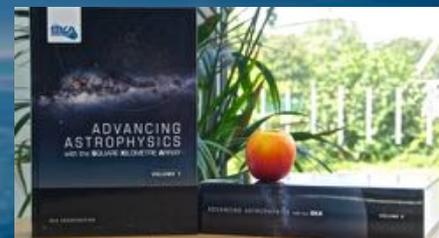


SKAによる突発天体

～サイエンスブックより～

3

2. SKAによる突発天体 SKA Transients:12編



SKA ARRAY
鏡

4

❖ <https://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=215>

Session 4: The Transient Universe

The Transient Universe with the Square Kilometre Array

PosSIAASKA140051 pdf R. Fender, A. Stewart, J.P. Macquart, I. Donnarumma, T. Murphy, A. Deller, Z. Paragi and S. Chatterjee

総論的な内容・観測予測

The SKA View of Gamma-Ray Bursts

PosSIAASKA140052 pdf D. Burion, G. Chirlanda, A. van der Horst, T. Murphy, R.A.M.J. Wijers, B. Gaensler, G. Ghisellini and I. Prandoni

GRB残光

Incoherent transient radio emission from stellar-mass compact objects in the SKA era

PosSIAASKA140053 pdf S. Corbel, J.C.A. Miller-Jones, R. Fender, E. Gallo, T. Maccarone, T. O'Brien, Z. Paragi, M. Rupen, A. Rushton, J. van Leeuwen, P. Verbiest, M. Kramer and P.A. Wouda

X線連星など

SKA as a powerful hunter of jetted Tidal Disruption Events

PosSIAASKA140054 pdf I. Donnarumma, E.M. Rossi, R. Fender, S. Komossa, Z. Paragi, S. van Velzen and I. Prandoni

潮汐破壊イベント

Fast Transients at Cosmological Distances with the SKA

PosSIAASKA140055 pdf J.P. Macquart, E. Keane, K. Grainge, M. McQuinn, R. Fender, J. Hessels, A. Deller, R. Bhui, R. Brentjens, S. Chatterjee, J. van Leeuwen, P. Verbiest, M. Kramer, J.D. van der Kruit, P. Best, L. Spitler, B. Stappers and C. Trott

瞬発電波バースト

The SKA contribution to GRB cosmology

PosSIAASKA140056 pdf I. Amari, S. Capozziello, A.C. Ruggeri, M. De Laurentis, M. Della Valle, D. Luongo and G. Stratta

GRBを使った宇宙論

Time domain studies of Active Galactic Nuclei with the Square Kilometre Array

PosSIAASKA140058 pdf H.E. Rignall, S.D. Croft, T. Hovatta, J.P. Koo, J. Lazio, J.P. Macquart and C. Reynolds

AGN

Core-collapse and Type Ia supernovae with the SKA

PosSIAASKA140060 pdf M. Pérez-Torres, A. Alberdi, R.J. Beswick, P. Lundqvist, R. Herrero-Illana, C. Romero-Cañizales, S. Ryder, M. Johnston, J. van Leeuwen, P. Verbiest, M. Kramer, J.D. van der Kruit, P. Best, L. Spitler, B. Stappers and E. Ros

II型とIa型の超新星

Thermal radio emission from novae & symbiotics with the Square Kilometre Array

PosSIAASKA140062 pdf T. O'Brien, M. Rupen, L. Chomiuk, V.A.R.M. Ribeiro, M. Bode, J. Sokoloski and P.A. Wouda

新星と共生星(X線連星)

Investigations of supernovae and supernova remnants in the era of SKA

PosSIAASKA140064 pdf L. Wang, X. Cui, H. Zhu and W. Tian

超新星と超新星残骸

The SKA and the Unknown Unknowns

PosSIAASKA140065 pdf P. Wilkinson

未知の発見

Early Phase Detection and Coverage of Extragalactic and Galactic Black Hole X-ray Transients with SKA

PosSIAASKA140066 pdf W. Yu, M. Zhang, Z. Yan and W. Zhang

X線連星とTDE

❖ 基本的に高速加速度運動する電子からの制動放射

❖ Incoherent Events

- 爆発現象 → 衝撃波 → 粒子加速 → シンクロトロン
- 輝度温度 10^{12} K を下回る (逆コンプトン限界・冷却)
- 明るい ≙ 大きい ≙ 変動遅い。画像上で変化
- 爆発現象のエネルギー収支・配分 (粒子・磁場) が分かる

❖ Coherent Bursts

- バルクの相対論的運動 (e.g. 曲率放射)、レーザー
- 10^{20} K (パルサー)。 10^{30} K (FRB) にも達しうる
- 散乱・分散の時間より短い ≙ 変動早い。主ビームで検出
- 伝搬した星間・銀河間物質の密度場や乱流場が分かる

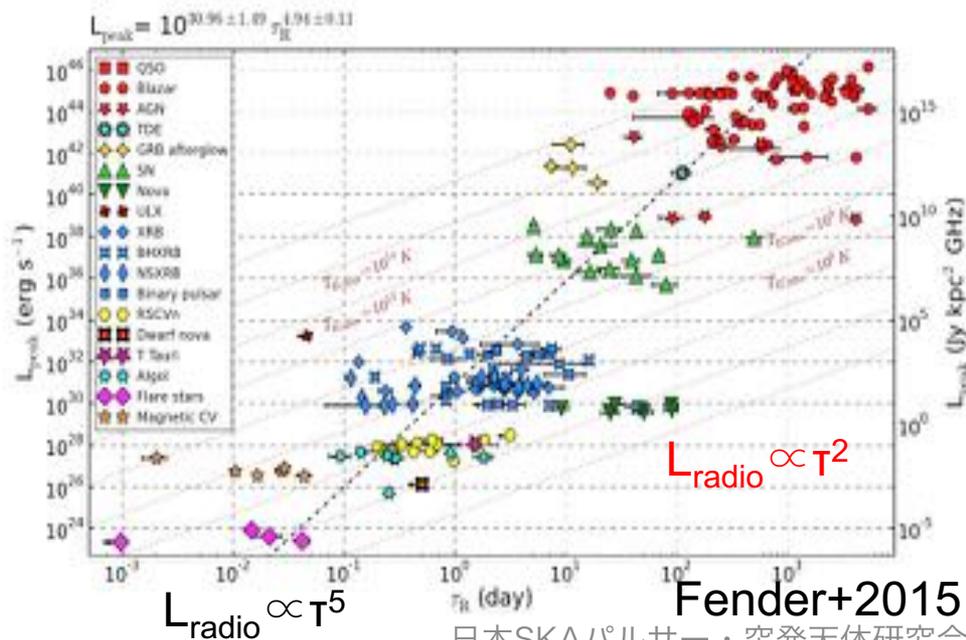
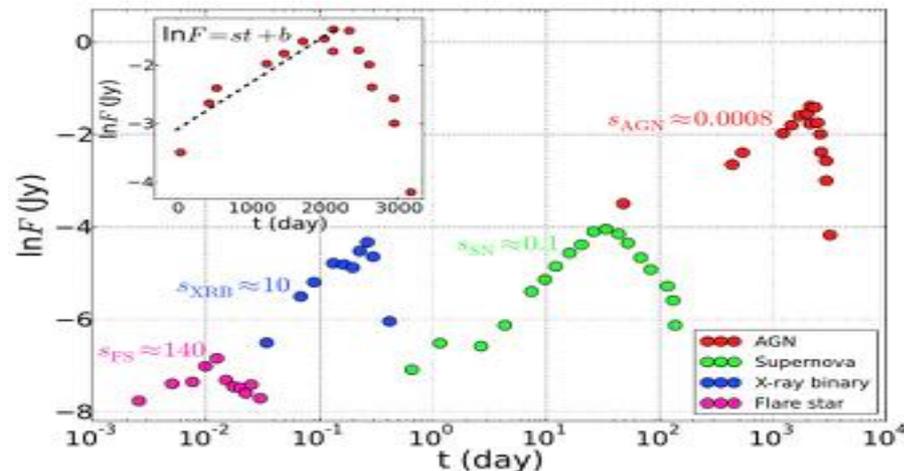
❖ なにが面白いのか？

- フレア星・X線連星・超新星・(AGN)
- 爆発現象のエネルギー収支と配分(粒子・磁場)を説明

❖ SKA1-MID戦略

- $L_{\text{radio}} \propto \tau^5$ を想定し緻密に観測→サンプル数を増やす
- Band2連続波サーベイ※とコメンサルに実施可能
- Cadenceを10日にできると毎回 $90 \mu\text{Jy}/\text{beam}$?

※31000平方度, 2"分解能, $2 \mu\text{Jy}/\text{beam}$



Fender+2015

日本SKAパルサー・突発天体研究会

2. SKAによる突発天体 電波先取り観測?

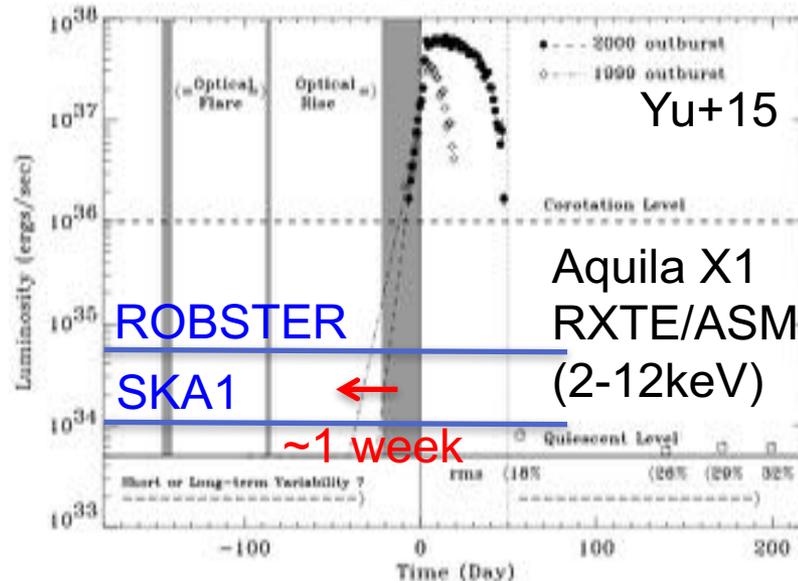
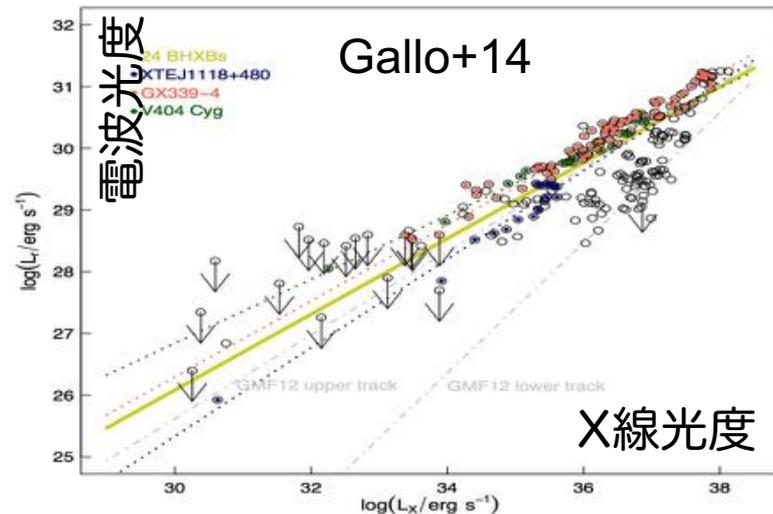
❖ X線と電波の光度の関係

- BHのLMXBフレア(ハード状態)
 $S_{\text{radio}} \propto S_X^{0.7}$ (Gallo+03;14)
- NSのLMXBフレア(Aquila X-1)
 $S_{\text{radio}} \propto S_X^{0.6}$ (Migliari+ 11)
- SMBHのTDEフレア(BH活動関係)
 $L_{\text{radio}} \propto L_X^{0.6}$ (Merloni+ 03)

❖ SKA1 vs. 将来のX線モニター

- Lobster型X線モニターを想定
- SKAが勝る(Yu et al. 2015)
 - 系内BH/NSのLMXBでは1週間前
 - 系外SMBHのTDEでは1日前

❖ SKAはX線より先に突発現象 (BH/NS/SMBH)の検出が可能?



さまざまなコヒーレント放射現象

電波望遠鏡

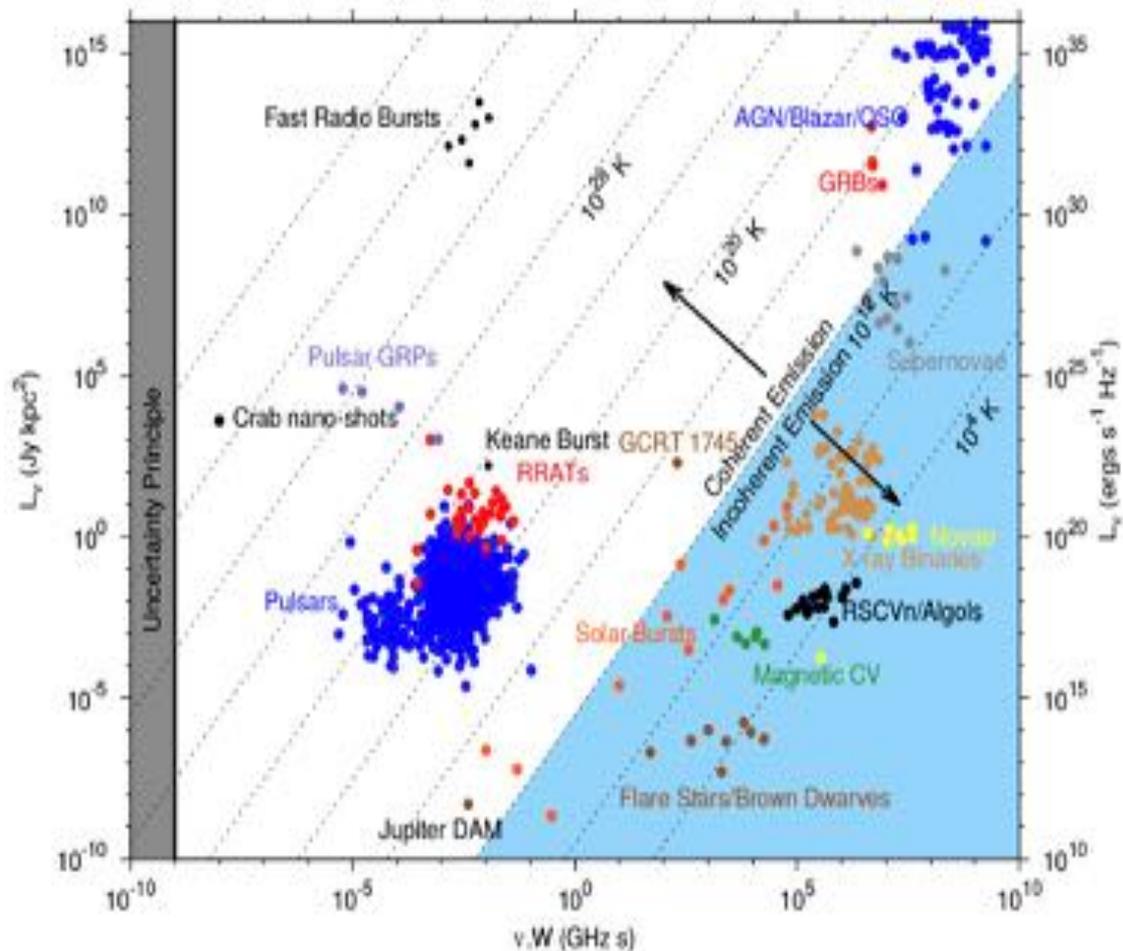
❖ なにが面白いのか？

- 中性子星・FRB
- 伝搬した星間・銀河間物質の密度場や乱流場が分かる
- 分～時の領域が未踏？ (新沼+07; 青木+14)

❖ SKA1-MID戦略

- リアルタイム解析
- 14 mJy* in 1ms @ Band2 (1.4 GHz)
- ~10⁷ FRBs/sky/day?

※ Parkesの約33倍感度が良い

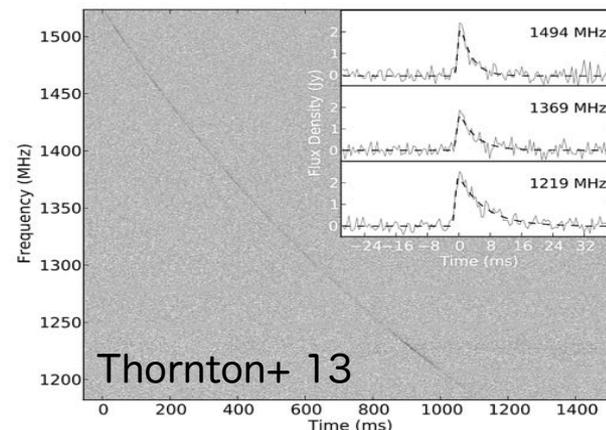


Fender+2015

- ❖ Jyレベルのセンチ波が~10ミリ秒間に発生
 - >30FRB。DM~300-2300 pc/cm³ → 系外起源？
 - ~1 (/deg²/week) (Macquart+15, Champion+15)

起源はいまだ不明

- ✓WDWD合体(Kashiyama+13)
- ✓近傍の星のフレア(Loeb+13)
- ✓超マグネター(Thornton+13)
- ✓重力崩壊SNやNS(Falcke+13)
- ✓NSNS合体(Totani+13)
- ✓BHの蒸発(Keane+12)
- ✓宇宙ひも(Cai+12)



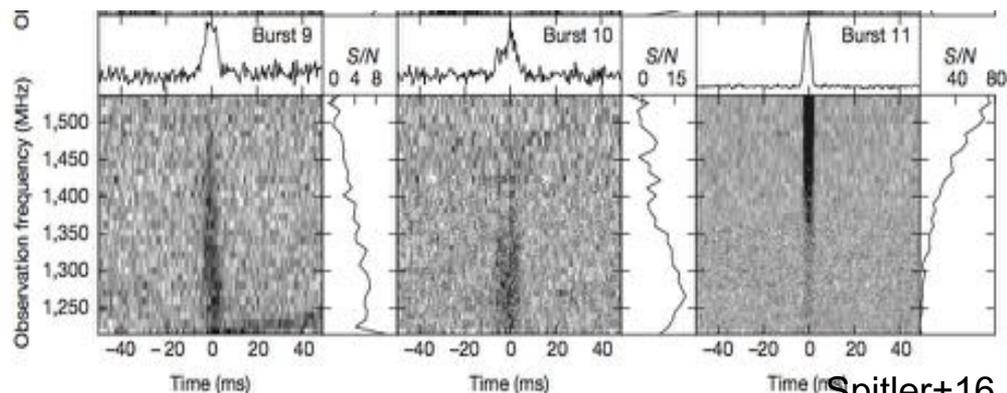
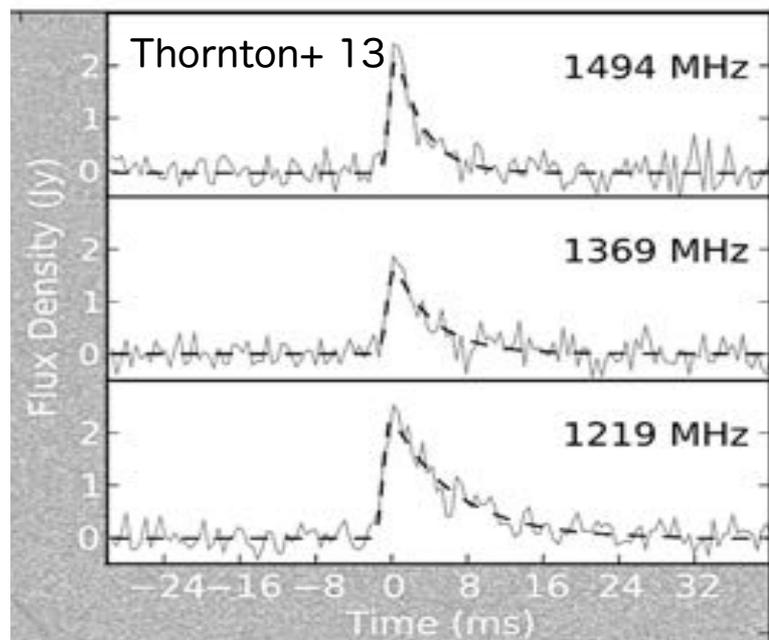
- ❖ FRB140514: 実時間(残光なし)、円偏波(~21±7%, 3σ) (Petroff+15)
- ❖ FRB110532: 直線偏波 & RM初検出(-186 rad/m²) (Masui+15)
- ❖ FRB121001: ダブルピークFRB (Champion+15)
- ❖ FRB121102: リポートFRB(幕指数-10から+14に変動!!) (Spitler+16)
 - VLBIにより位置も決定 (Chatterjee+17)
- ❖ FRB150418: ホスト(z~0.49, Ω_{IGM} ~4.9±1.3%) (Keane+16)
 - 銀河間物質n_e(Ω_{IGM})の独立検出+赤方偏移→宇宙論パラメータに制限！
- ❖ FRB150807: 120Jyの化物FRB。B_{LSS} < 21(1+z) nG (Ravi+16)
 - 銀河団や大規模構造を調査可能！

2. SKAによる突発天体

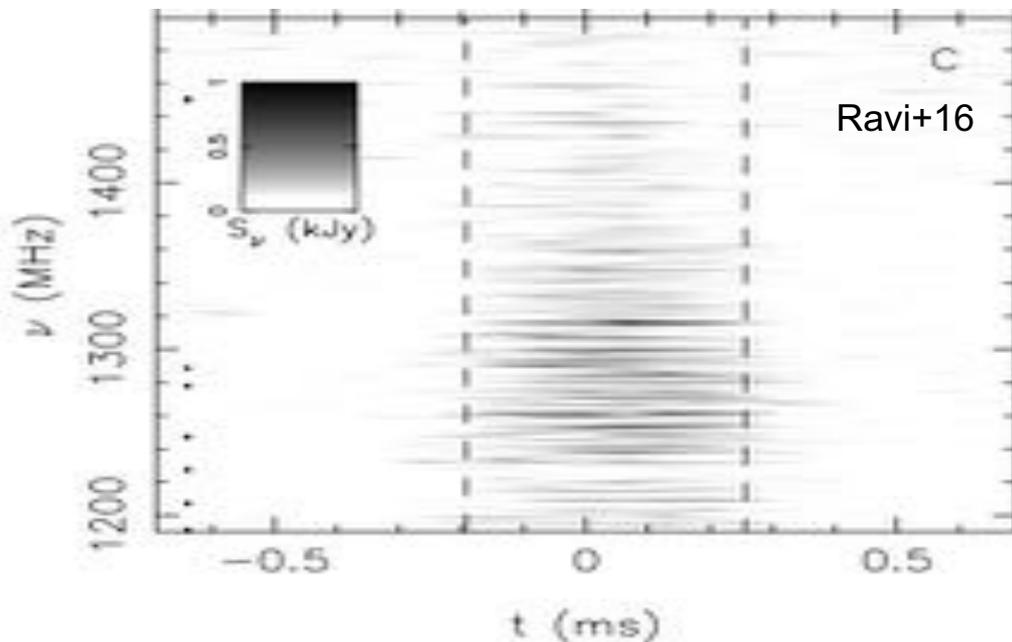
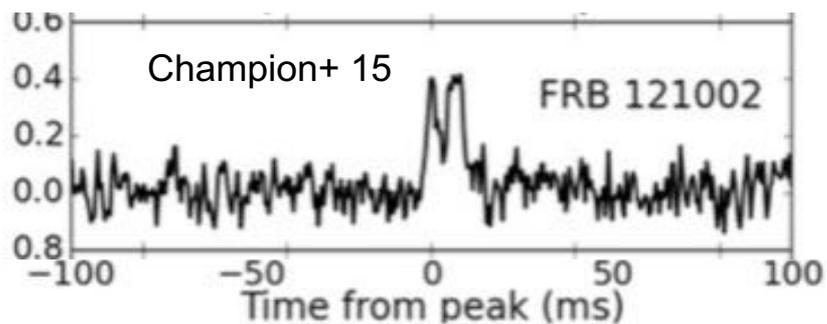
Fast Radio Burst (FRB)

SQUARE KILOMETRE ARRAY
百万平米電波望遠鏡

10



Spitler+16



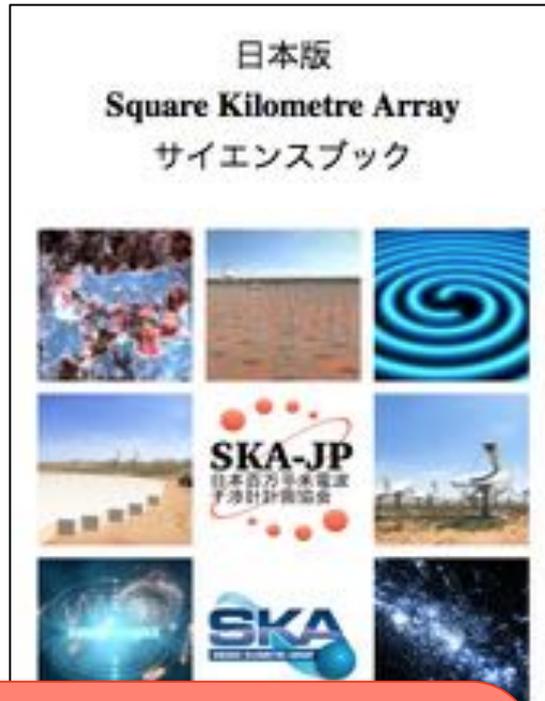
2. SKAによる突発天体 日本のサイエンス

SQUARE KILOMETRE ARRAY
百万平米電波望遠鏡

11

❖ ダイナミックな宇宙を解き明かす 時間領域の天文学

- 系外の超新星爆発
- SNRにおける粒子加速の現場、
および星間物質と磁場の相互作用
- 電波によるGRBの即応した追観測
- マグネター磁気圏の解明
- 死んだ電波銀河のシェルからの放射
- 重力波-電波マルチメッセンジャ観測
- **FRBの偏波の可能性と宇宙磁場**
- 未知の突発天体の探査



ジャンル
既知のコヒーレント
な放射から、経路
上の物質を探る

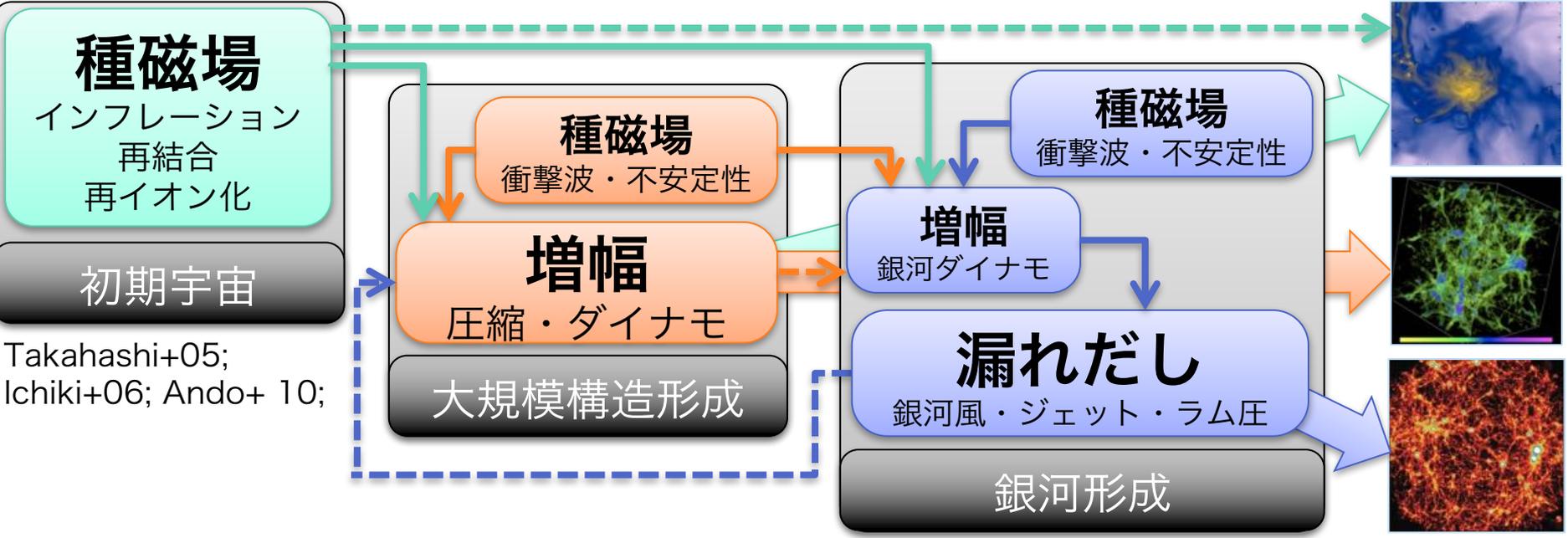


直線偏波FRBを用いた 宇宙大規模構造の探査

12

3. FRBで大規模構造探査

ミッシングバリオンと磁場の謎



❖ 磁場は銀河団で μG ならフィラメントで1-100nG程度
- RM \sim 1-10 rad/m²と予想(TA, Ryu 10;11)

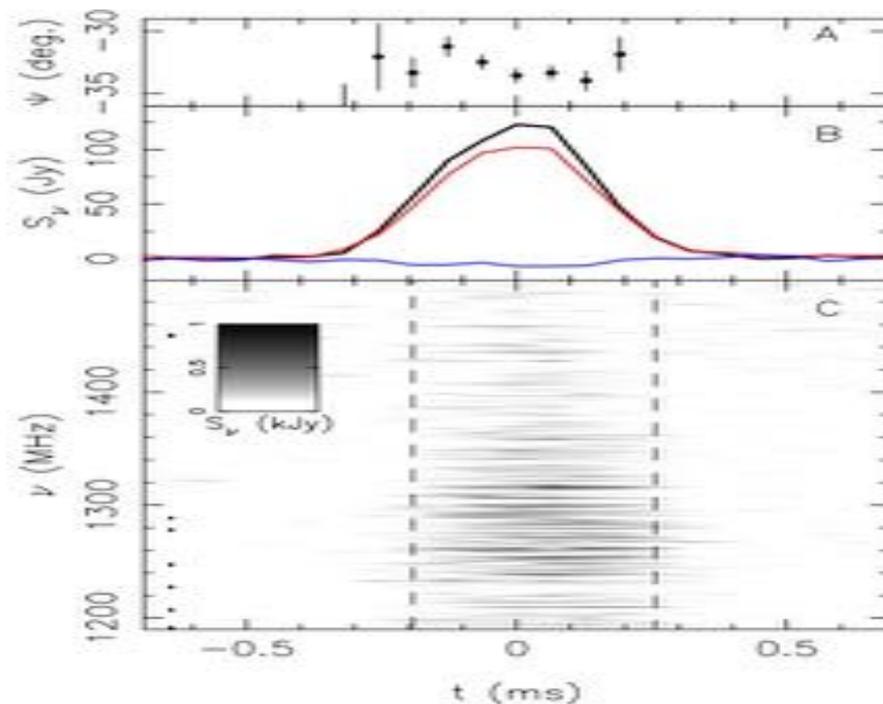
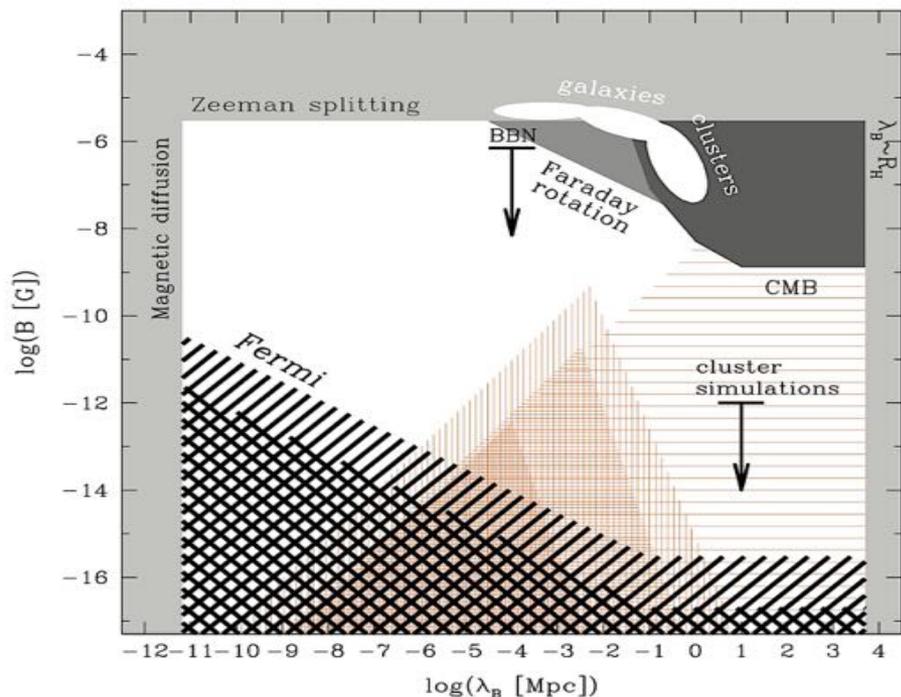
上から
Dubois &
Tessier 08
Ryu+08
Donnert+09

❖ ガンマ線ペアハロー

- 赤方偏移~1のブレイザー
- $B > 3 \times 10^{-7} \text{ nG}$ (Neronov & Vovk 2010, Science)
- 主にボイドのIGMF

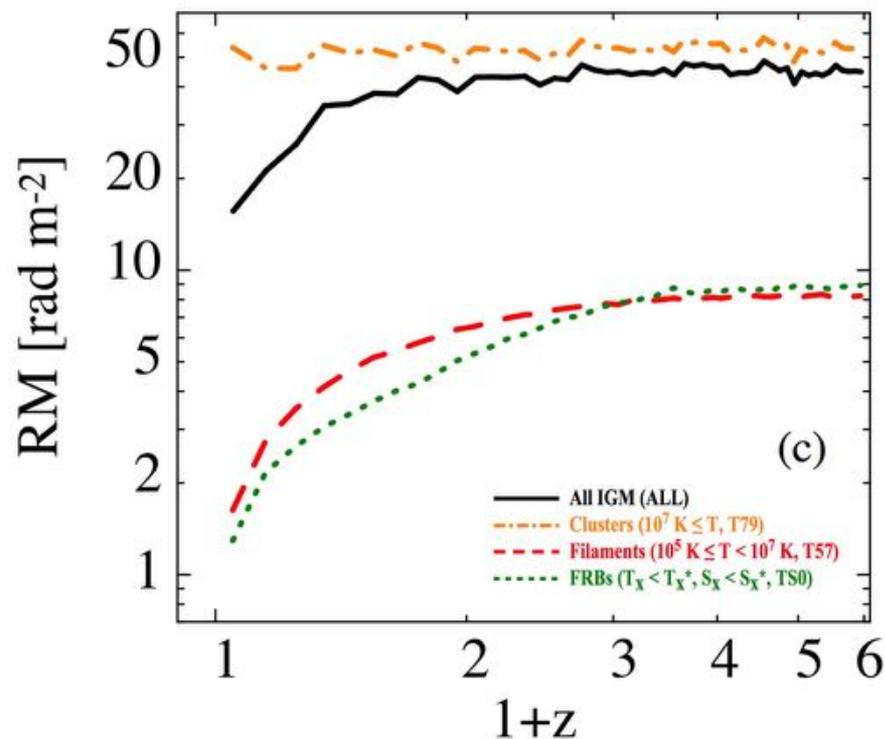
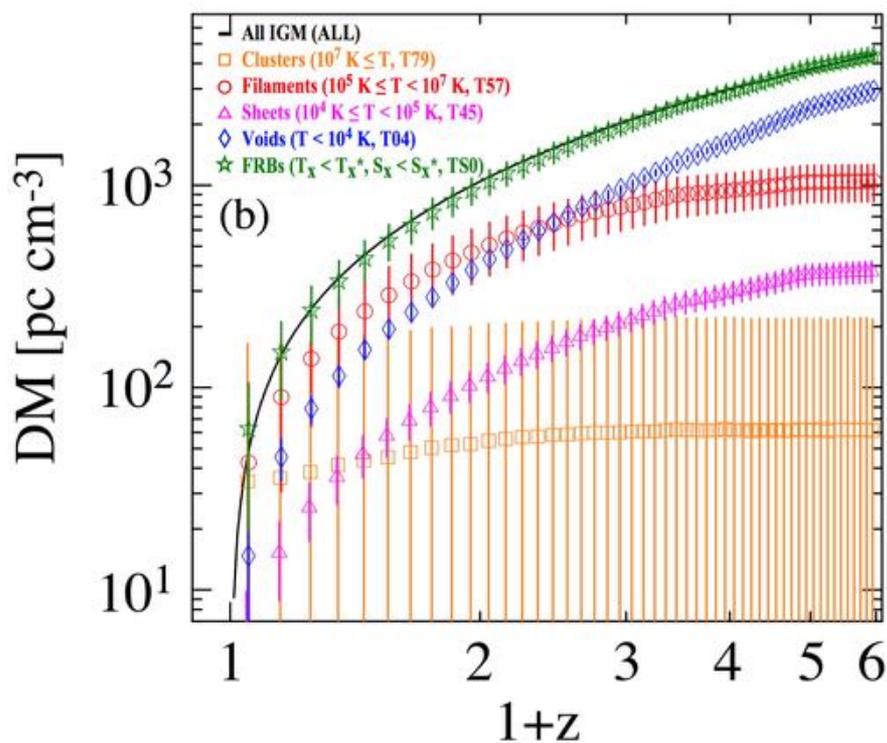
❖ 直線偏波したFRB

- DM赤方偏移~0.1のFRB
- $B < 21 (1+z) \text{ nG}$ (Ravi et al. 2016, Science)
- 主にフィラメントのIGMF



❖ 宇宙大規模構造の物質分布の特徴

- 経路の90%はボイド、DMはWHIM($z < 1$)とボイド($z > 1$)が支配
- RMは銀河団が支配的。次いでWHIM



Λ CDM ($\Omega_{m0}=0.27, \Omega_{\Lambda 0}=0.73, H_0=70$)

Akahori, Ryu, Gaensler (2016)

重力波&電磁波サーベイ&突発天体研究会

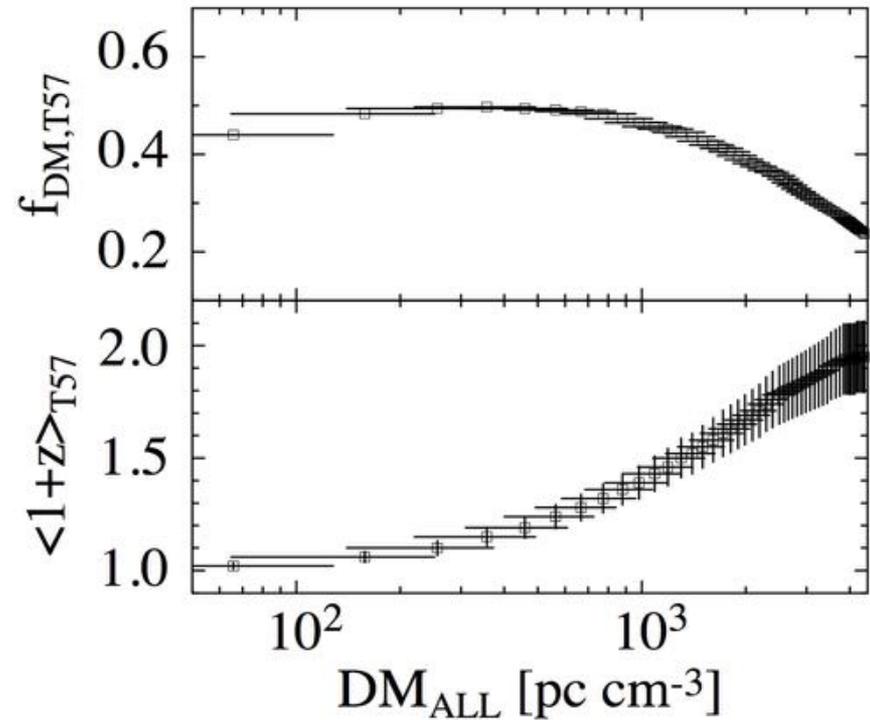
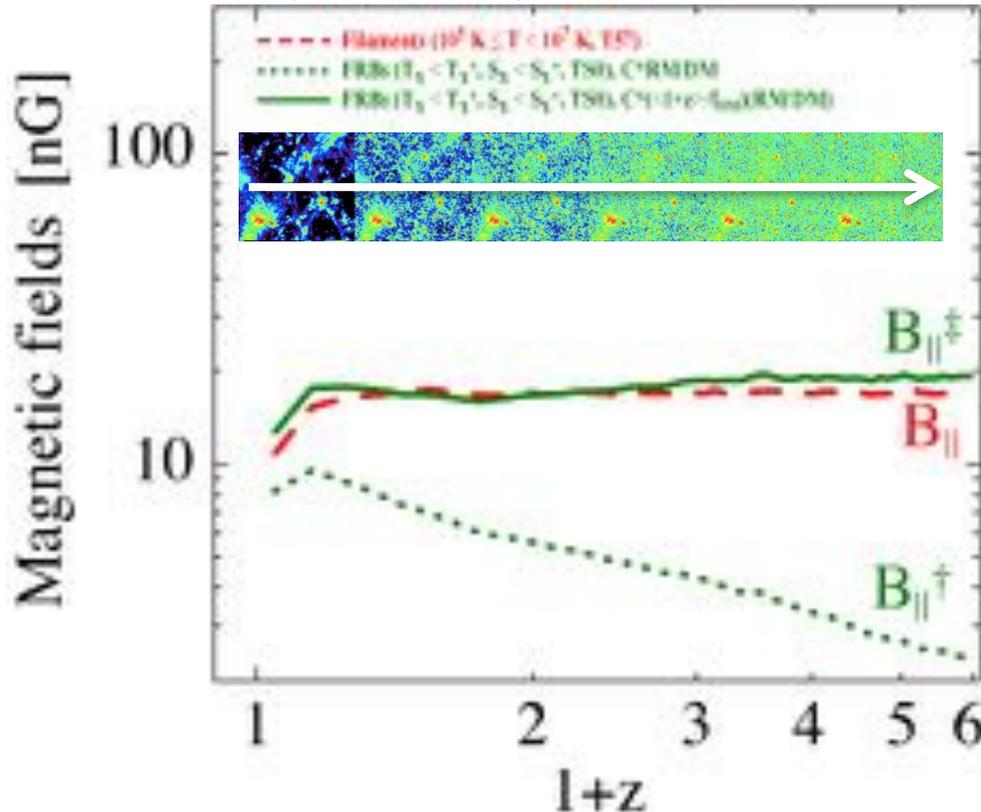
瞬発電波バーストから分かるか？

❖ 偏波したFRBからDMとRMを同時に計測できる

- ただし $B_{||} \sim RM/DM$ ではない

$\Omega_{M0}=0.27, \Omega_{\Lambda0}=0.73, H=70$

$$B_{||}^{\ddagger} = \frac{\langle 1+z \rangle}{f_{DM}} B_{||}^{\dagger} = \frac{\langle 1+z \rangle}{f_{DM}} \frac{C_D RM}{C_R DM}$$



3. FRBで大規模構造探査

理想的な光源を選別できるか？

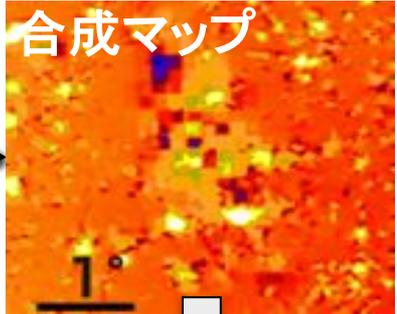
光源
random
 $\sigma_{INT} = \sigma_{INT,0} / (1+z)^2$
 $\sigma_{INT,0} = 10 \text{ rad/m}^2$

銀河間
map
Akahori, Ryu 2011

介在銀河
random, 50% MgII

天の川
map
Akahori+ 2013

観測ノイズ
random Gaussian
 $\sigma_{ERR} = 1 \text{ rad/m}^2$



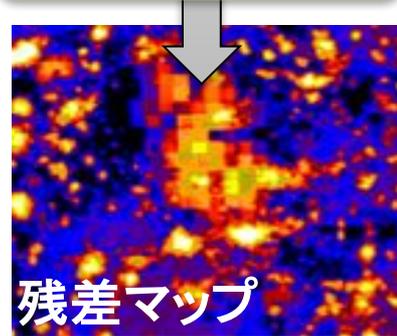
銀河団フィルタ

光源フィルタ

銀河フィルタ

ノイズフィルタ

天の川フィルタ



❖ 銀河間のRM成分だけを取り出すフィルタの開発

X線表面輝度・温度マップの参照

可視・HI等で高z天体のみ抽出

偏波解消を示す天体の除去

観測好条件のサンプルのみ利用

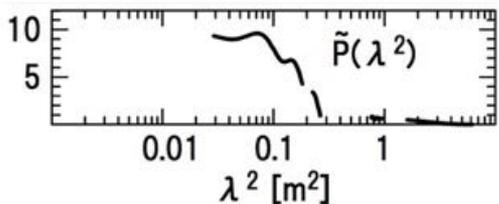
大角度成分の除去

Akahori, Gaensler, Ryu (2014a)他

3. FRBで大規模構造探査

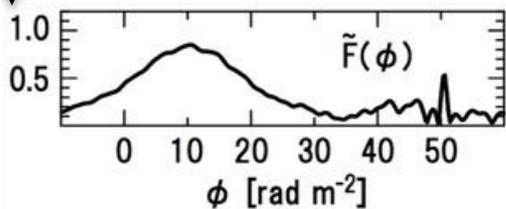
トモグラフィーで断層解析できるか?

観測された $P=Q+iU$

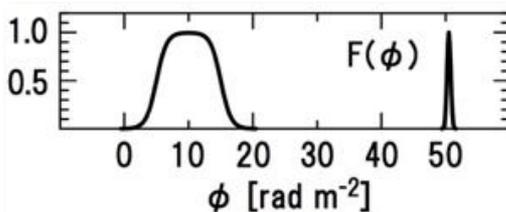


$$F(\phi) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2$$

再構成した F



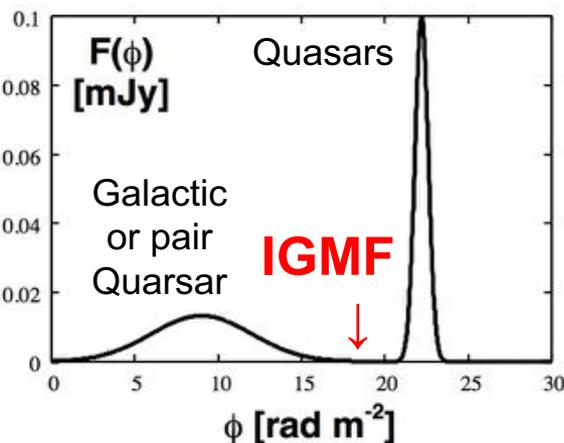
本当の F



SKA1 Band2 + L/B1/B3

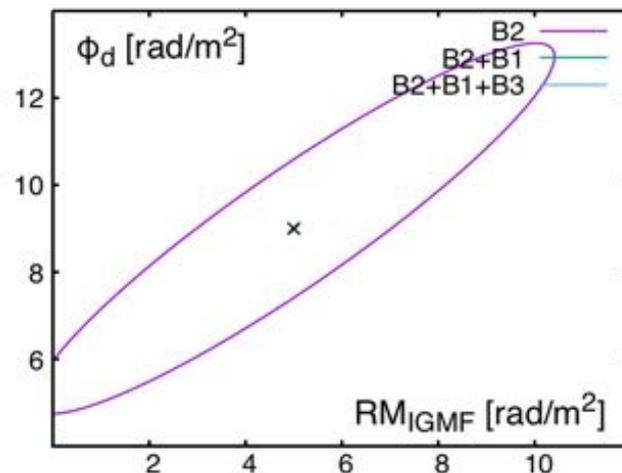
$$S_{\text{QSO}} : S_{\text{MW}} : N_{\text{oise}} = 1000 : 100 : 10 \text{ (}\mu\text{Jy/beam)}$$

$$\text{RM}_{\text{IGMF}} = 5 \text{ rad/m}^2, \text{ 観測Noiseあり, RFIなし}$$



$$F(\phi) = \frac{f_d}{\sqrt{2\pi}\delta\phi_d} e^{2i\theta_d} \exp\left\{-\frac{(\phi - \phi_d)^2}{2\delta\phi_d^2}\right\} + \frac{f_c}{\sqrt{2\pi}\delta\phi_c} e^{2i\theta_c} \exp\left\{-\frac{(\phi - \phi_c)^2}{2\delta\phi_c^2}\right\}$$

2 Gaussians, 8 params



❖ Null IGMFを
~3σ以上で棄却

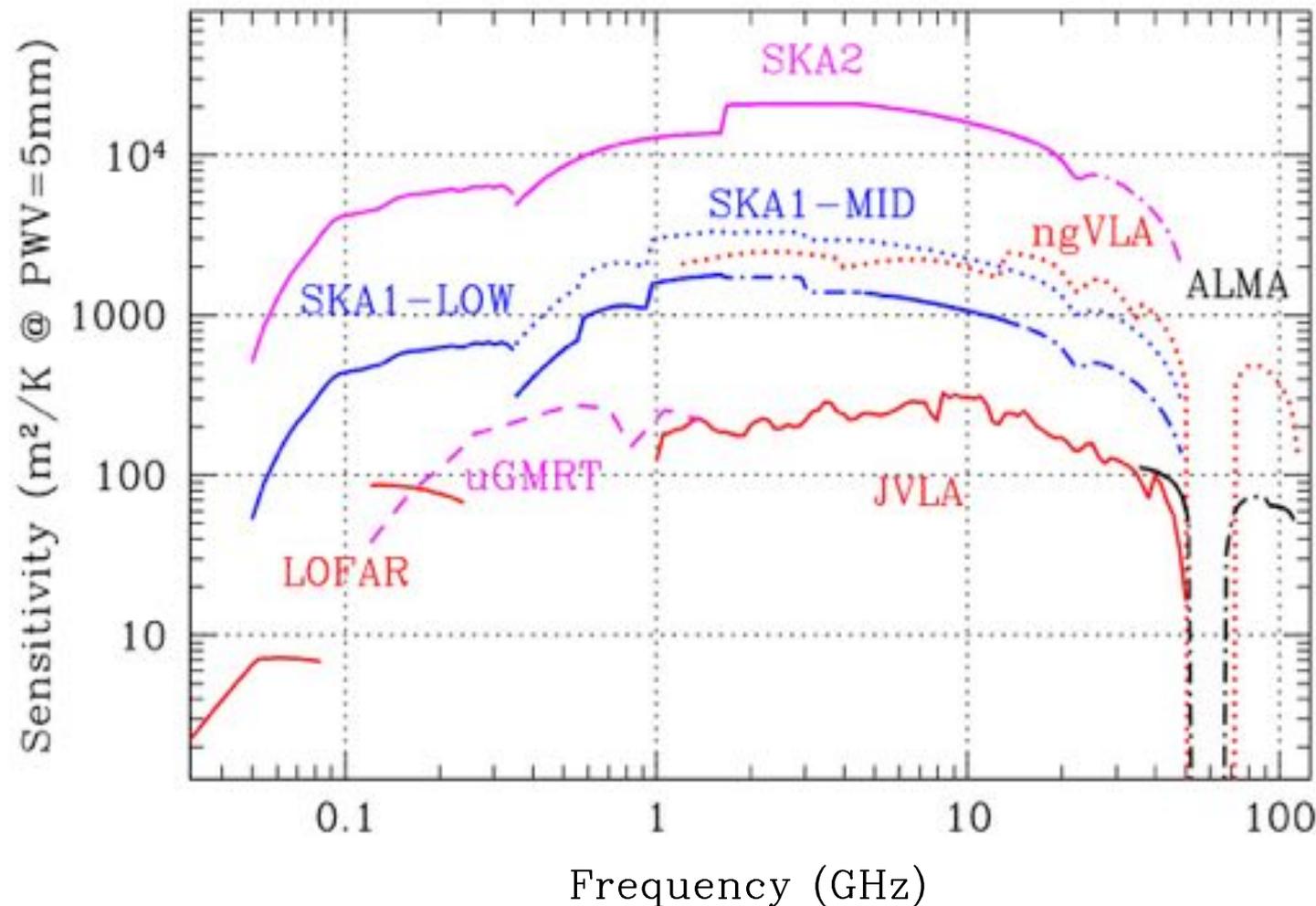


SKAのスペックと 開発提案

19

4. SKAのスペックと開発提案 感度比較

SQUARE KILOMETRE ARRAY
百万平米電波望遠鏡



SKA1-MIDは
Aeff/TsysのSKA133
台とMeerKAT64台の
合計

LOWは256基からなる
40m局256台、天頂角
45度以内の平均値、
T₄₀₈=20Kを仮定

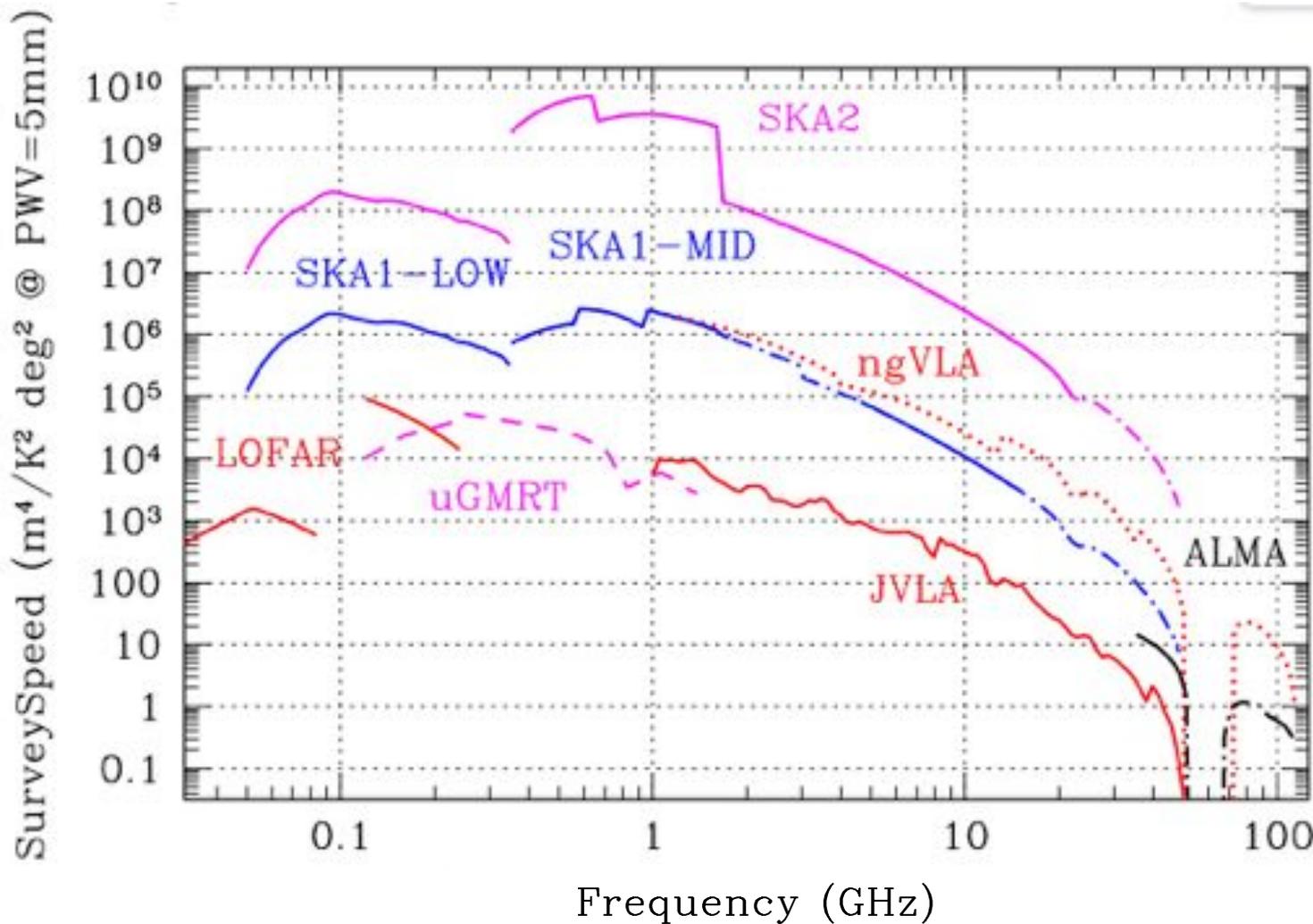
SKA2-MIDは
SKA2000台で0.35-
1.67GHzはPAFを仮定、
SKA2-LOWは4880局
を仮定

SKA1-MIDの点線はア
ンテナ数を2倍にした場
合

- ngVLAが1.5B\$なの
で・・・費用対感度的
には同じだよと言いた
い

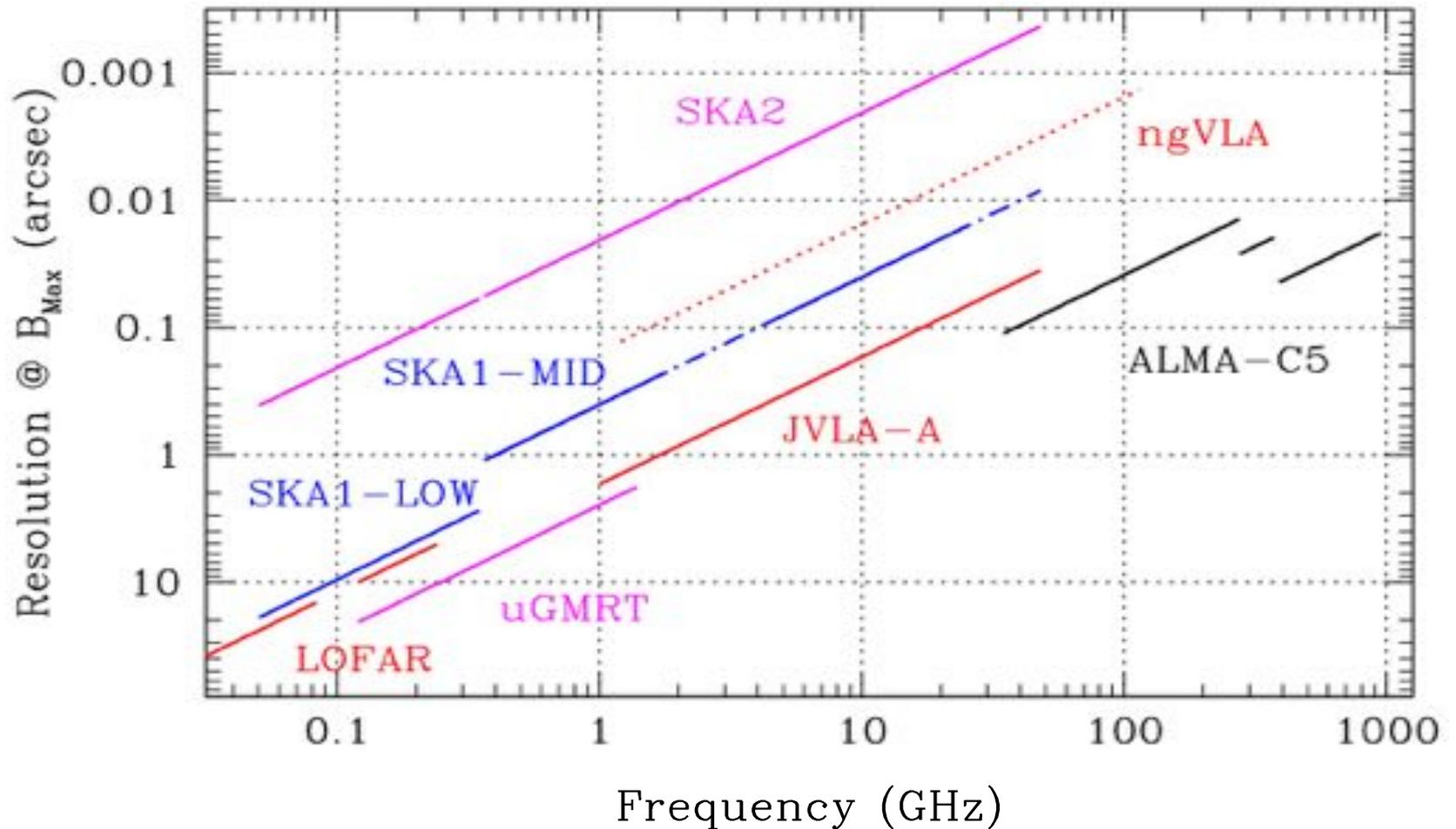
4. SKAのスペックと開発提案 サーベイ速度比較

SQUARE KILOMETRE ARRAY
百万平米電波望遠鏡



4. SKAのスペックと開発提案 角度分解能比較

SQUARE KILOMETRE ARRAY
百万平米電波望遠鏡

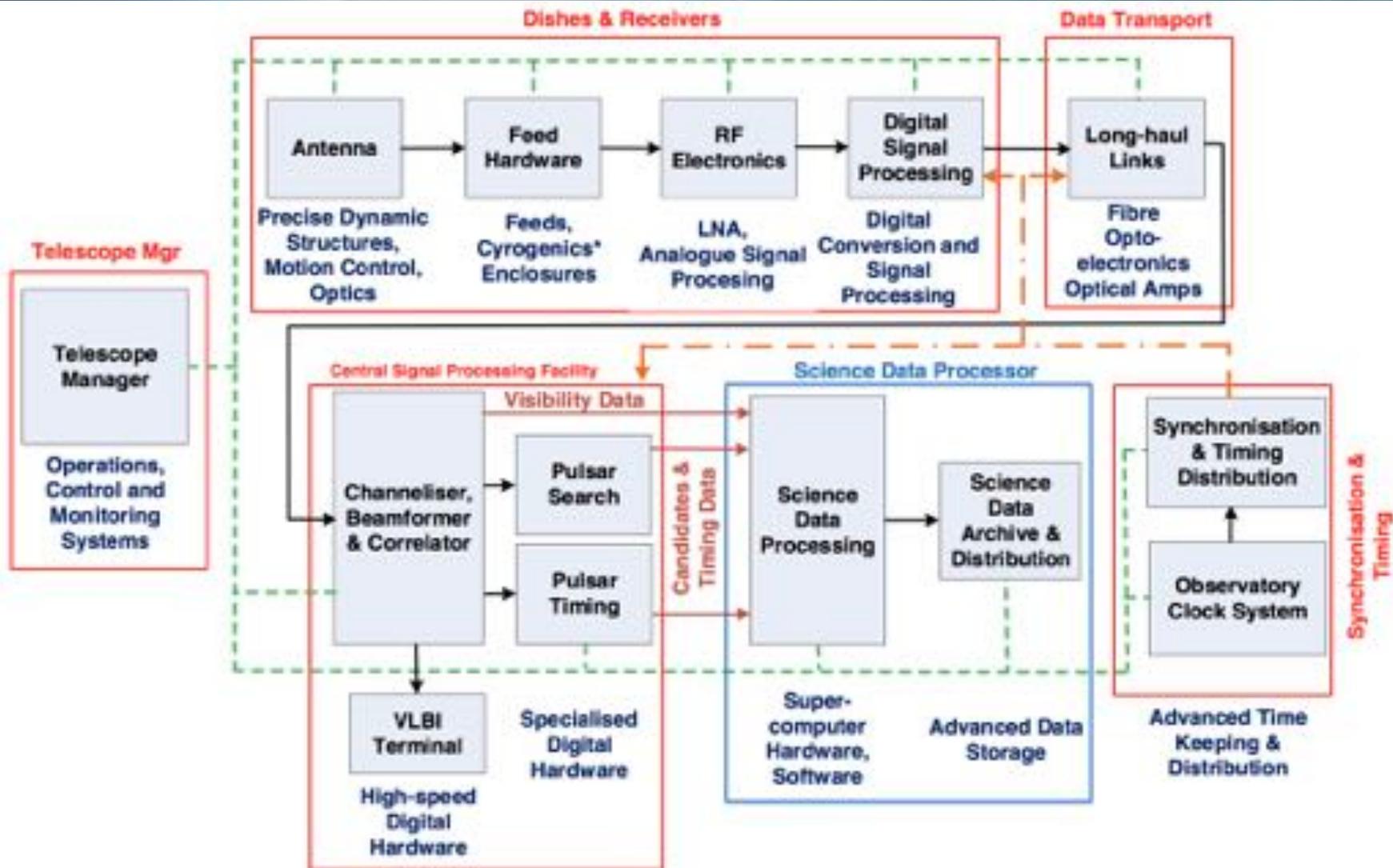


4. SKAのスペックと開発提案

データフローと観測モード (MID)

SQUARE KILOMETRE ARRAY
平方キロメートル波望遠鏡

23

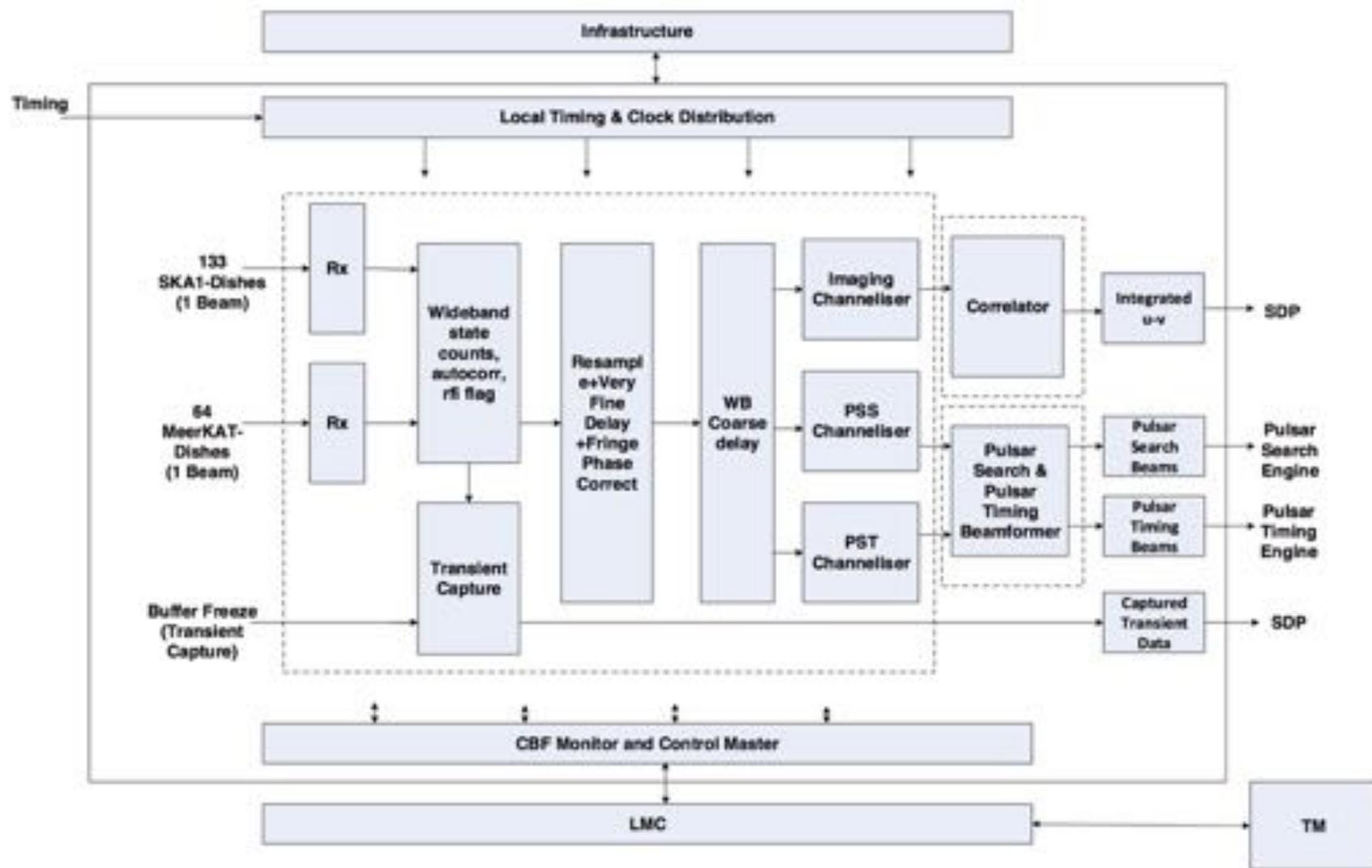


4. SKAのスペックと開発提案

データフローと観測モード (MID)

SQUARE KILOMETRE ARRAY
電波望遠鏡

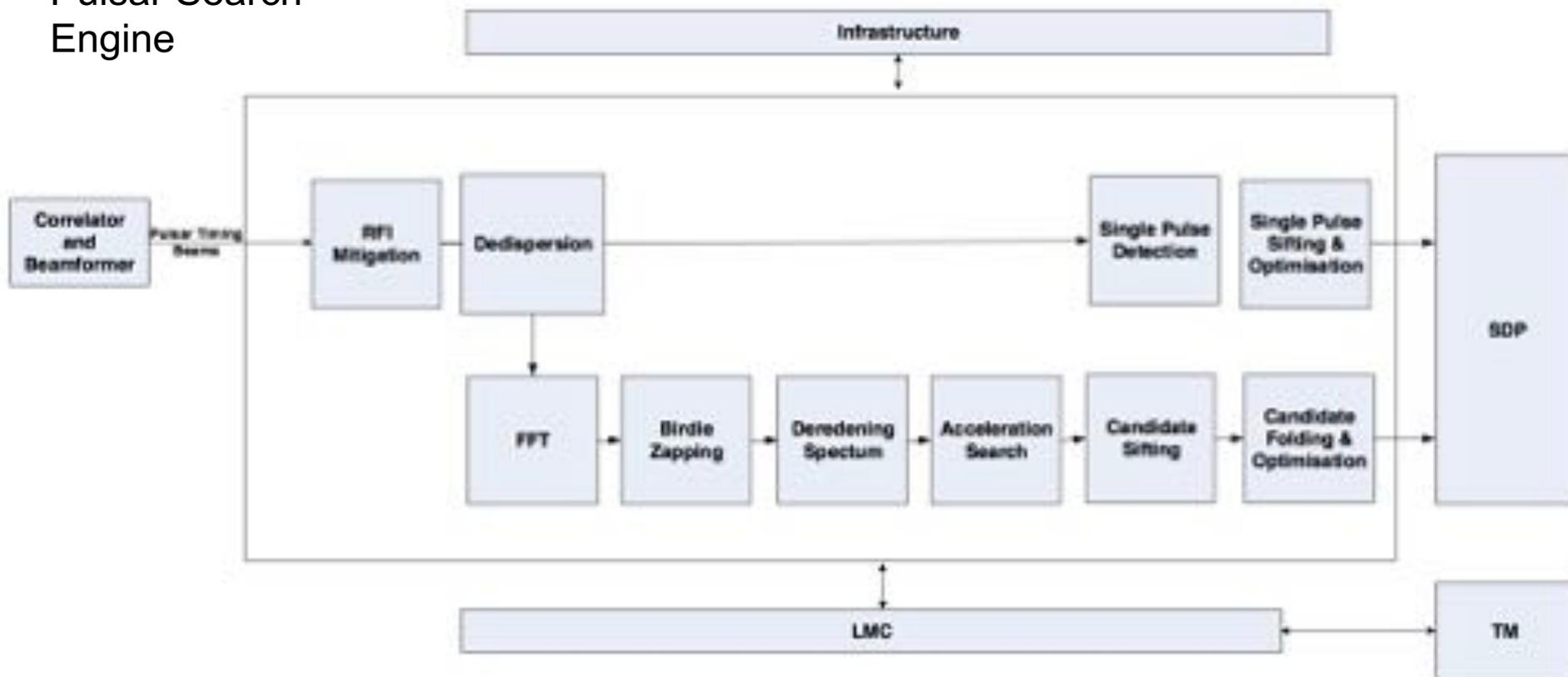
24



4. SKAのスペックと開発提案

データフローと観測モード (MID)

Pulsar Search Engine



Pulsar Timing Engine

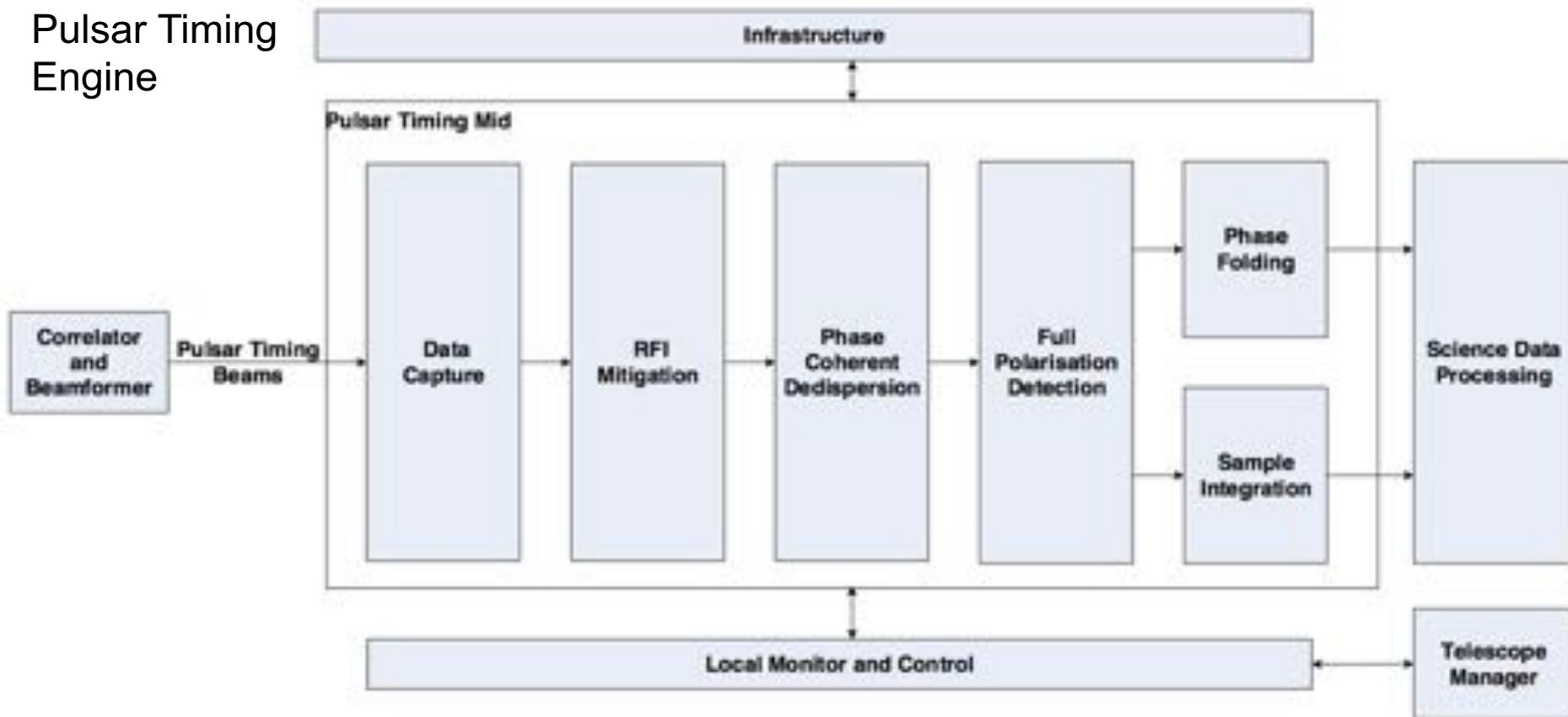


Table 2: Concurrency of Observing Modes for the CBF and Pulsar Processing

Sub-array Observing Mode	Concurrency ¹⁰		
Standard Spectral Line Imaging	X		
Zoom Spectral Line Imaging		X	
Continuum Imaging	X		
Pulsar Search (PSS)	X	X	
Pulsar Timing (PST)	X	X	
VLBI			X
Transient Search	X	X	X

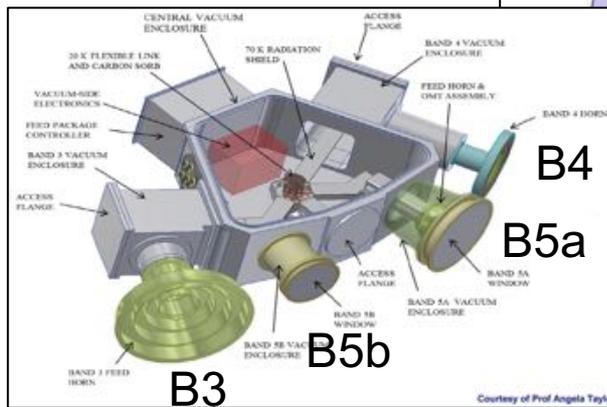
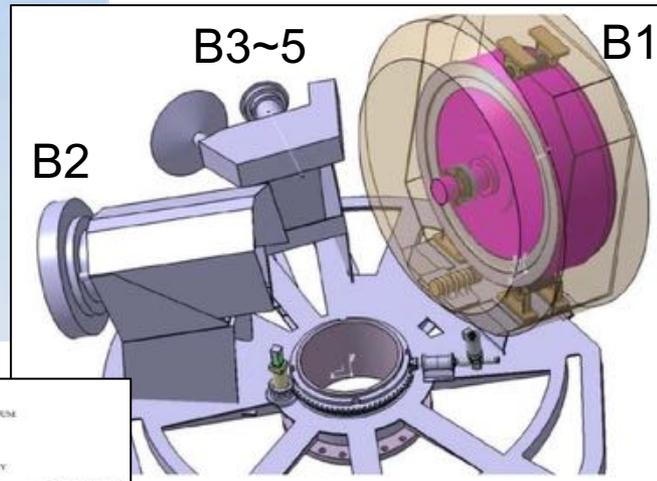
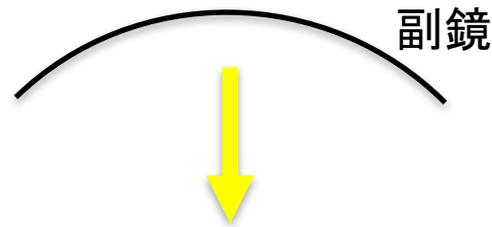
4. SKAのスペックと開発提案 周波数バンド

SQUARE KILOMETRE ARRAY
百万平米電波望遠鏡

28

❖ 一度に観測できる
周波数は限られる

施設		周波数(GHz)
LOW	1	0.05-0.35
MID	1	0.35-1.05
	2	0.95-1.76
	3	1.65-3.05
	4	2.80-5.18
WBSPF	5a	4.60-8.50
	5b	8.00-15.3
	5c?	14-26 ?
	6?	24-48?
	A	1.60-5.20
WBSPF	B	4.60-24.0



広帯域に渡って両偏波
ビーム形状やインピー
ダンス特性が一定の給
電部を作るのが難しい

4. SKAのスペックと開発提案

UHF全帯域受信システムの開発

SQUARE KILOMETRE ARRAY
電波望遠鏡

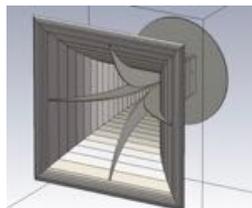
SKA機構文書: WBSPF-RfP-04-Technical-Solution_online.pdf
21_-_Pantaleev_WBSPPf-SKA_engineering_meeting-20131009.pdf

❖ 世界でも開発進んだが撤退

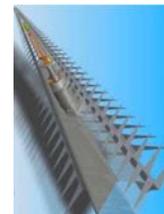
WBSPF A: 0.35-2.6 GHz → 1.6-5.2 GHz



0.4-1.5GHz
Chalmers (Sweden)
Φ785mm x D311mm
-10dB HBW~62°



0.27 – 1.62 GHz
FAST QRFH
(Caltech)
L1m x D0.83m



0.5-11.5GHz
ATA feed (US)
L0.3m x D1.2m
-10dB HBW~43°

❖ 日本こそUHF帯域が重要

- トモグラフィーを最大化
- Super EAVN with FAST

❖ UHFフィード+HFSフィルタ

- 革新的なフィードの開発
- 急峻なフィルターの実装
- 高速な信号処理



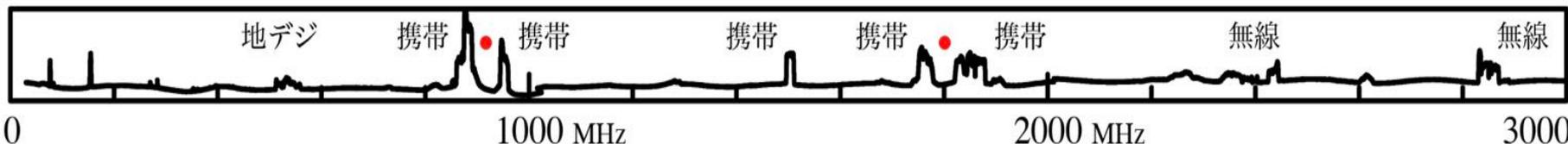
広帯域
フィード



高温超伝導
フィルタ



高速AD
変換器



NICT鹿島でのRFIの様子(赤堀ら2017)

❖ Transientsとは？

- 突発的現象と変動天体
- インコヒーレントとコヒーレントな放射
- エネルギー収支の解明と周辺&伝搬環境の情報

❖ SKAによる突発天体～サイエンスブックより～

- 緻密な観測からサンプルを増やす
- 備え新しい発見に挑む

❖ 直線偏波FRBを用いた宇宙大規模構造の探査

- 大規模構造の磁場を推定できる新たなプローブ
- 広帯域(UHF)な両偏波データの取得が鍵

❖ SKAのスペックと開発提案

- UHF全帯域受信システムを作りたいです