

次世代電波望遠鏡SKAによる パルサー研究の未来



高橋慶太郎
熊本大学
2017.11.25

目次

1、SKA

2、SKA Japan

3、SKAによるパルサー観測

4、重力波直接検出

5、相対論検証

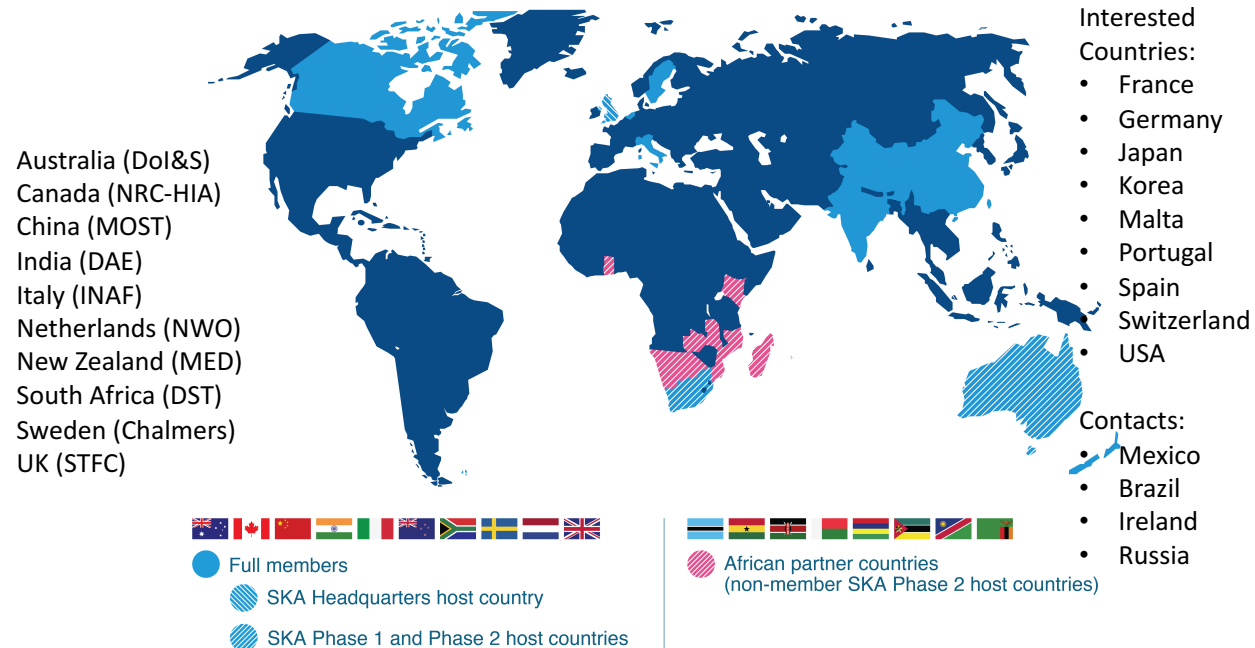
6、まとめ

1、SKA

Square Kilometre Array

次世代大型長波長電波望遠鏡

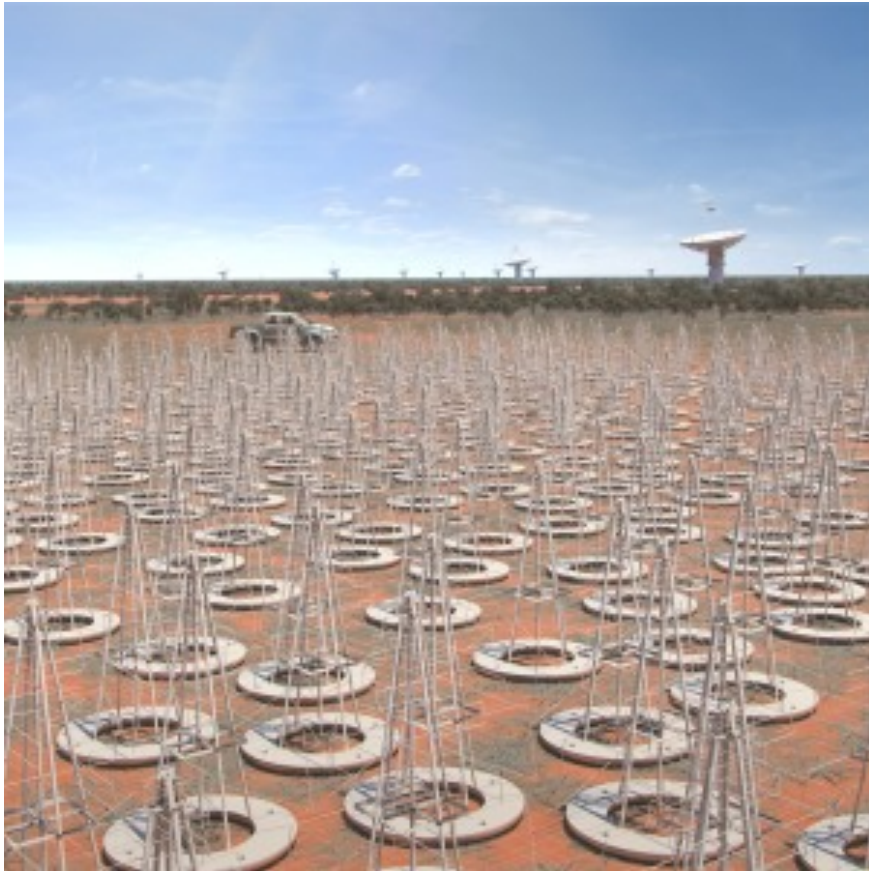
- 特徴：高感度・広帯域・広視野・高分解能
- 基本的にはサーベイ望遠鏡
(一部PI制、ターゲット観測も)
- SKA1: 10% (~900億円)
- SKA2: 100% (~数千億円?)
- 2021年より初期科学運用開始



Square Kilometre Array

SKA-low

- ・ オーストラリア
- ・ 50 - 350MHz

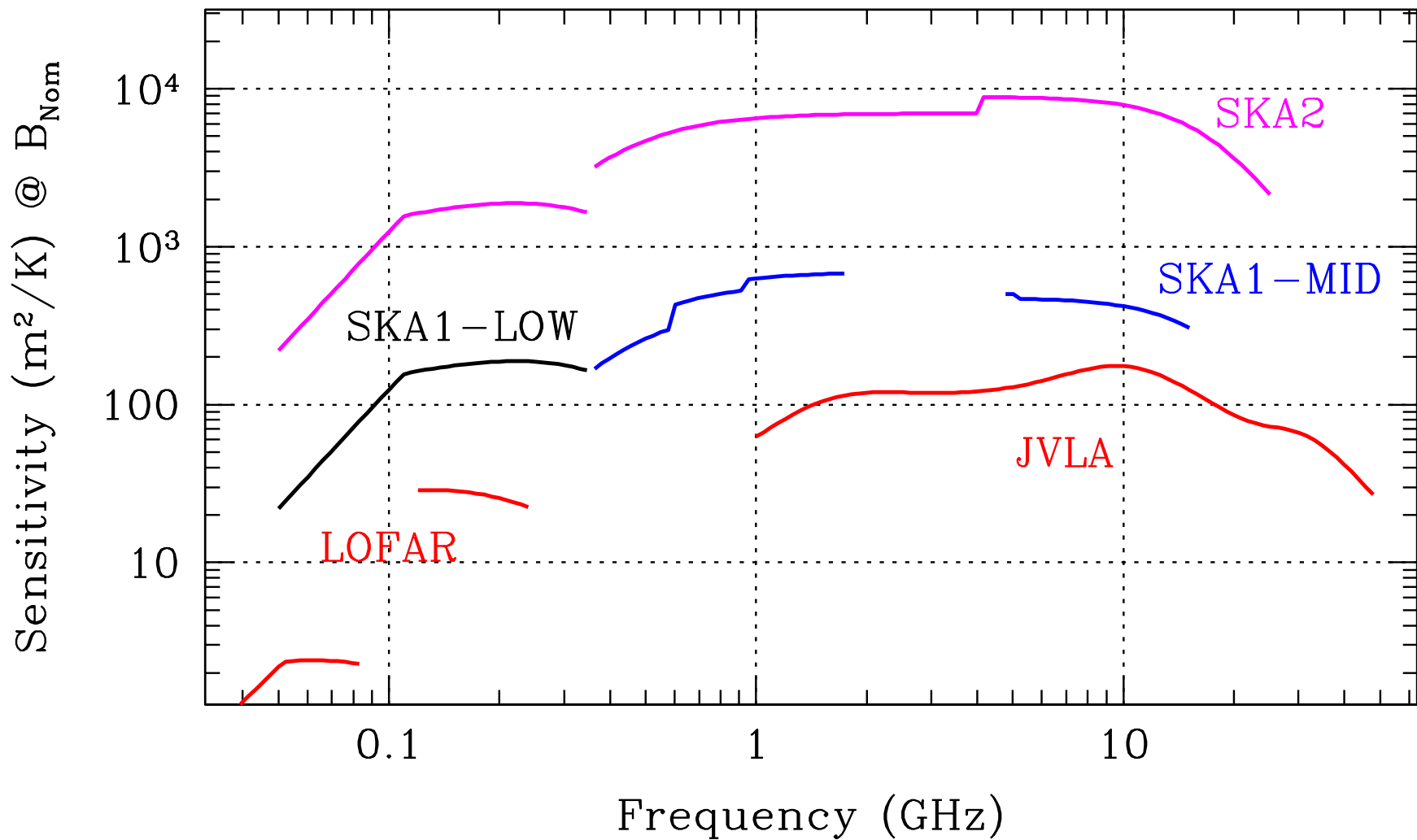


SKA-mid

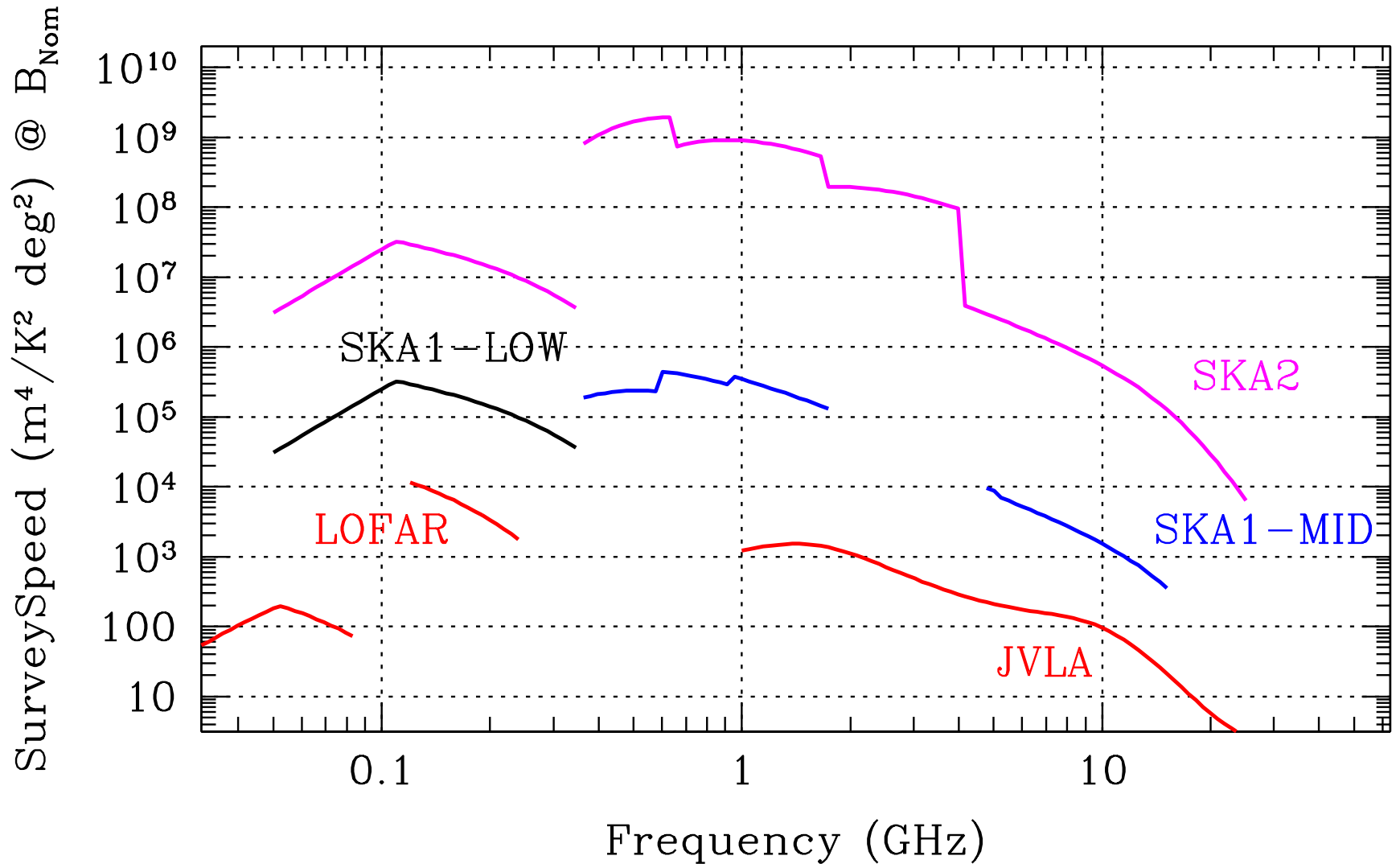
- ・ 南アフリカ
- ・ 350MHz - 24GHz



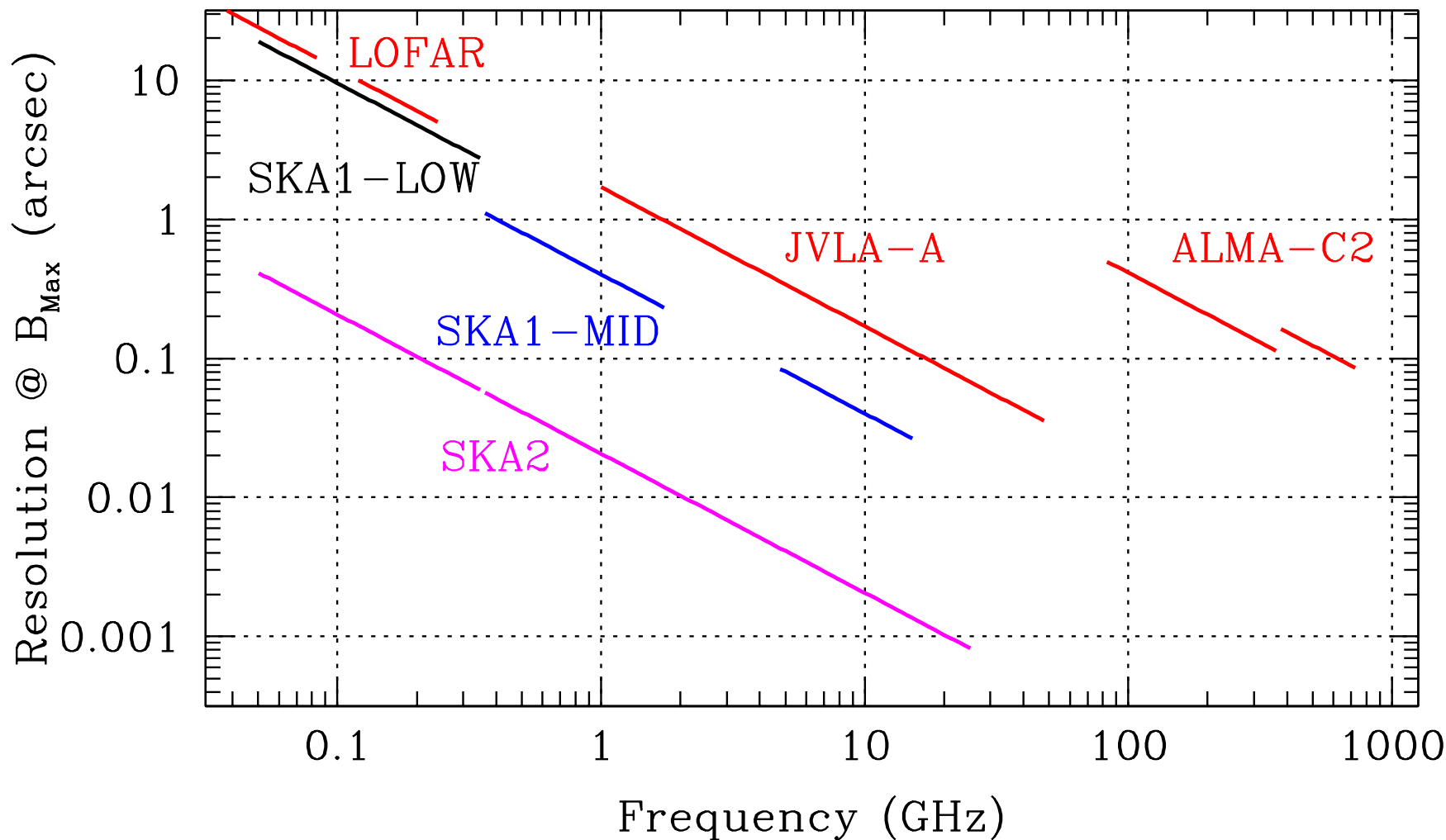
性能：感度



性能：サーベイ速度



性能：角度分解能



スケジュール

17

18

19

20

21

22

23

24

25

SKA1建設

SKA1本格運用

SKA1初期運用

SKA2デザイン

SKA2建設

MeerKAT Phase1

Phase 2, 3

ASKAP初期運用

本格運用

MWA Phase2

Phase3

サイエンス

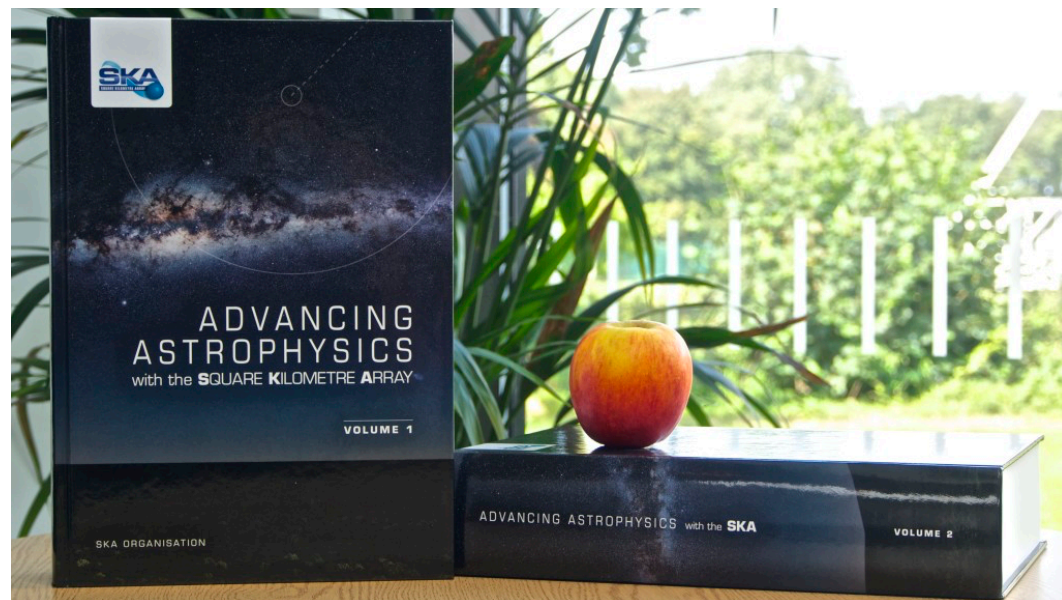
Key Science

- パルサー
- 暗黒時代と宇宙再電離
- 宇宙磁場の起源と進化
- 宇宙における生命
- 銀河進化 (HI, continuum)
- 突発天体
- 宇宙論

Focus Group

- VLBI
- 太陽と地球大気
- 宇宙線

2,000ページ、8.8kg!



2、SKA-Japan

SKA Japan組織

2008年設立、メンバー～200人
執行部

- ・ 代表：杉山（名古屋）
- ・ 副代表：高橋（熊本） 赤堀（水沢）
- ・ 顧問：小林（NAOJ）
- ・ 広報：中西（鹿児島）
- ・ Science Working Group
 - 代表：市來（名古屋）
 - 副代表：竹内（名古屋）
- ・ 外部資金：今井（鹿児島）
- ・ Engineering Working Group
 - 代表：青木（山口）



SKA Japan組織

Science Working Group

代表：市來（名古屋）

副代表：竹内（名古屋）

- ・ 遠方宇宙：平下（ASIAA）
 - 銀河進化：竹内（名古屋）
 - 宇宙論：山内（神奈川）
 - 再電離：長谷川（名古屋）
- ・ パルサー：高橋（熊本）
- ・ 宇宙磁場：町田（九州）
- ・ 突発天体：新沼（山口）
- ・ 位置天文：今井（鹿児島）
- ・ 星間物質：立原（名古屋）
- ・ 星惑星形成：塚本（鹿児島）
- ・ 宇宙生物：??（??）

Engineering Working Group

代表：青木（山口）

- ・ フロントエンド
- ・ バックエンド
- ・ データ解析

産業フォーラム

代表：熊沢（東陽テクニカ）

SKA-Japanパルサーチーム

青木貴弘（早稲田大）
今井裕（鹿児島大）
大野寛（東北文教大）
亀谷收（国立天文台）
隈本宗輝（熊本大）
黒柳幸子（名古屋大）
柴田晋平（山形大）
関戸衛（NICT）
高橋慶太郎（熊本大）
岳藤一宏（NICT）
寺澤敏夫（理研）
成子篤（東工大）
本間希樹（国立天文台）
米丸直之（熊本大）
柳哲文（名古屋大）

パルサー理論
パルサー観測
相対論
宇宙論
の混成チーム！

新しいチームです。
メンバー募集中！

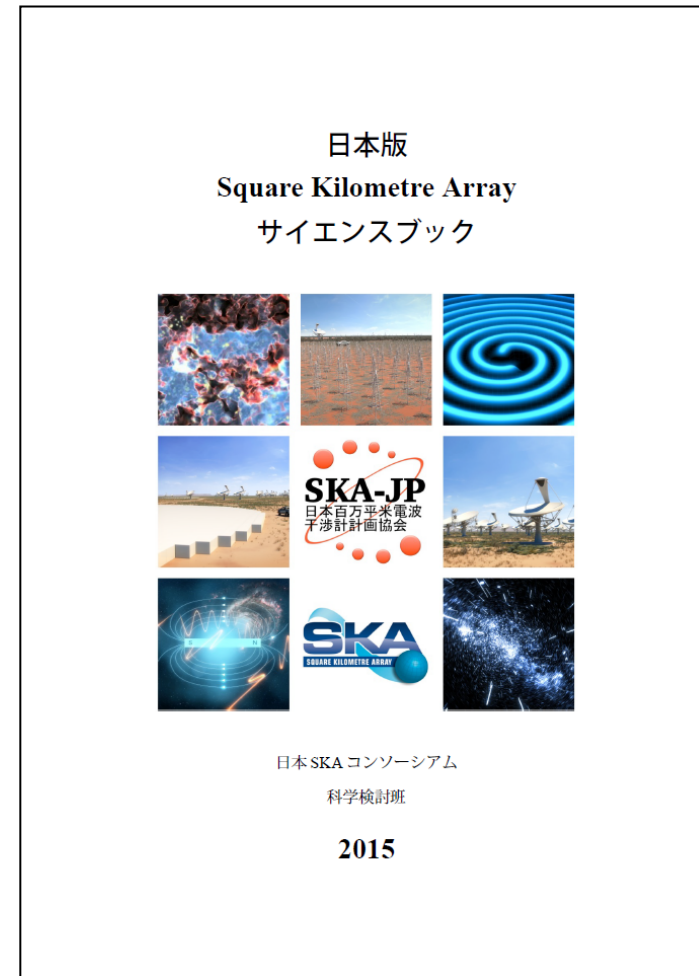
日本版サイエンスブック

日本語版

- 2015年2月完成、320ページ、執筆者～60人
- 再電離、宇宙論、銀河進化、パルサー
宇宙磁場、近傍宇宙時空計測
星間物質、突発天体
- 内容：
 - 分野レビュー
 - 国際サイエンスレビュー
 - 日本サイエンス

英語版

- 2016年3月完成
(2016/3/8のarXivに6編)
- 英語化＋準備研究進展のまとめ
- 2018年大幅改訂予定





galaxy evolution: 1603.01938

Formation, Evolution, and Revolution of Galaxies by SKA: Activities of SKA-Japan Galaxy Evolution Sub-SWG

Tsutomu T. Takeuchi¹, Kana Morokuma-Matsui², Daisuke Iono^{2,3}, Hiroyuki Hirashita⁴, Wei Leong Tee^{4,5}, Wei-Hao Wang⁴, Rieko Momose^{2,6,7}, on behalf of the SKA-Japan Galaxy Evolution sub-Science Working Group

cosmology: 1603.01959

Cosmology with the Square Kilometre Array by SKA-Japan

Daisuke YAMAUCHI^{1,*}, Kiyotomo ICHIKI^{2,3}, Kazunori KOHRI^{4,5}, Toshiya NAMIKAWA^{6,7}, Yoshihiko OYAMA⁸, Toyokazu SEKIGUCHI⁹, Hayato SHIMABUKURO^{2,10}, Keitaro TAKAHASHI¹⁰, Tomo TAKAHASHI¹¹, Shuichiro YOKOYAMA¹², Kohji YOSHIKAWA¹³, on behalf of SKA-Japan Consortium Cosmology Science Working Group

magnetism: 1603.01974

Resolving 4-D Nature of Magnetism with Depolarization and Faraday Tomography: Japanese SKA Cosmic Magnetism Science

Takuya AKAHORI^{1,*}, Yutaka FUJITA², Kiyotomo ICHIKI³, Shinsuke IDEGUCHI⁴, Takahiro KUDOH⁵, Yuki KUDOH⁶, Mami MACHIDA⁷, Hiroyuki NAKANISHI¹, Hiroshi OHNO⁸, Takeaki OZAWA¹, Keitaro TAKAHASHI⁹, Motokazu TAKIZAWA¹⁰, on behalf of the SKA-JP Magnetism SWG.



pulsar: 1603.01951

SKA-Japan Pulsar Science with the Square Kilometre Array

Keitaro TAKAHASHI¹, Takahiro AOKI², Kengo IWATA³, Osamu KAMEYA⁴, Hiroki KUMAMOTO¹, Sachiko KUROYANAGI³, Ryo MIKAMI⁵, Atsushi NARUKO⁶, Hiroshi OHNO⁷, Shinpei SHIBATA⁸, Toshio TERASAWA⁵, Naoyuki YONEMARU¹, Chulmoon YOO³ (SKA-Japan Pulsar Science Working Group)

EoR: 1603.01961

Japanese Cosmic Dawn/Epoch of Reionization Science with the Square Kilometre Array

Kenji HASEGAWA^{1,*}, Shinsuke ASABA¹, Kiyotomo ICHIKI¹, Akio K. INOUE², Susumu INOUE³, Tomoaki ISHIYAMA⁴, Hayato SHIMABUKURO^{1,5}, Keitaro TAKAHASHI⁵, Hiroyuki TASHIRO¹, Hidenobu YAJIMA⁶, Shu-ichiro YOKOYAMA⁷, Kohji YOSHIKAWA⁸, Shintaro YOSHIURA⁵, on behalf of Japan SKA Consortium (SKA-JP) EoR Science Working Group

astrometry: 1603.02042

Radio Astrometry towards the Nearby Universe with the SKA

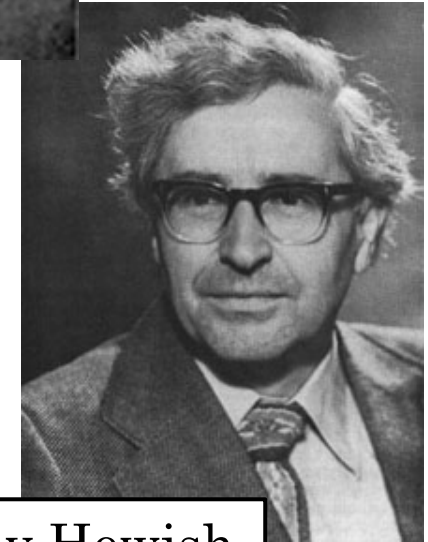
Hiroshi Imai¹, Ross A. Burns¹, Yoshiyuki Yamada², Naoteru Goda³, Tahei Yano³, Gabor Orosz¹, Kotaro Niinuma⁴ and Kenji Bekki⁵ (SKA Japan Astrometry Science Working Group)

日本は参加するの？

- 日本は今はメンバー国ではない
- SKA-Japanは関心のある主に大学の、主に理論家の研究者コミュニティ
→ 国立天文台に圧力
- VLBIコミュニティと協力
- 国立天文台水沢VLBI観測所の将来計画としてSKAを提案、推進室設置を要求

3、SKAによるパルサー観測

Jocelyn Bell



Antony Hewish

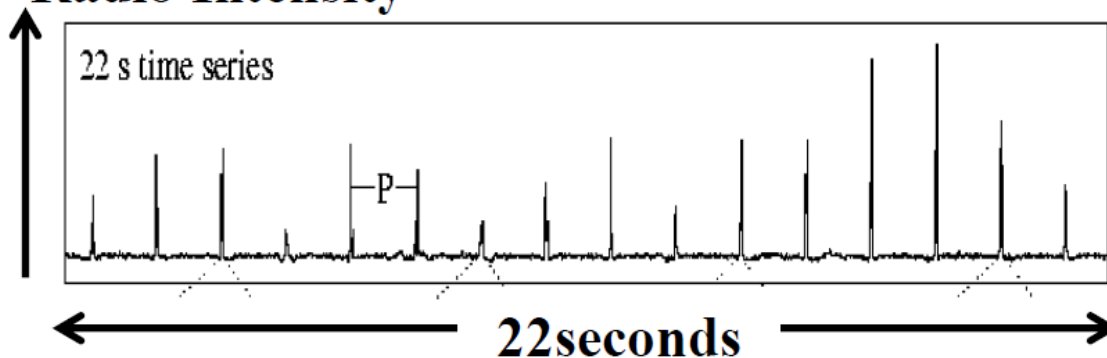
パルサー

- 周期的なパルス
- 周期：1msec – 10sec
- 正確な周期 → 宇宙の時計
- 現在2,500個程度発見

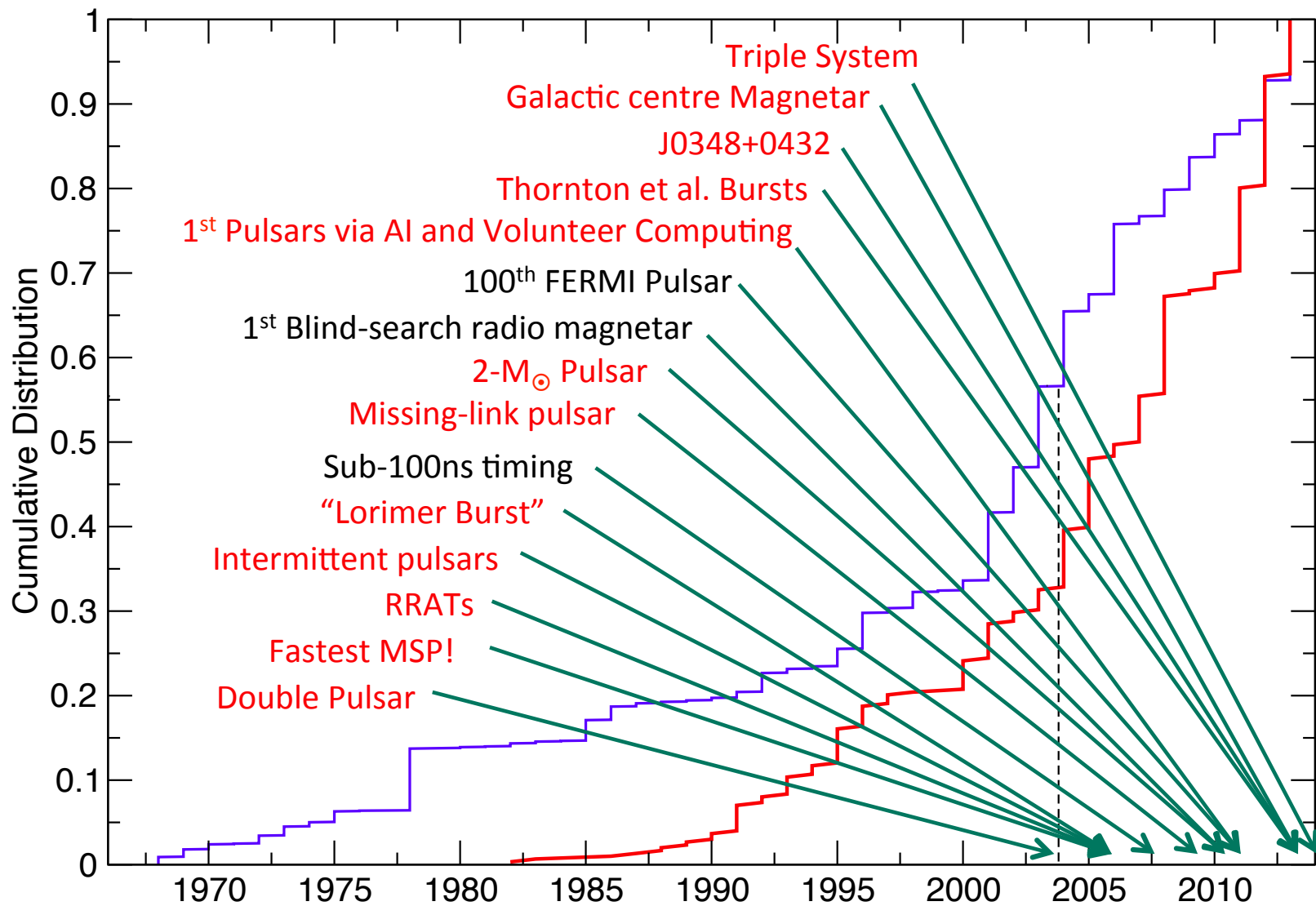
Pulses from a pulsar(PSR B0301+19)

(in Lorimer and Kramer,“Handbook of Pulsar Astronomy”,2005)

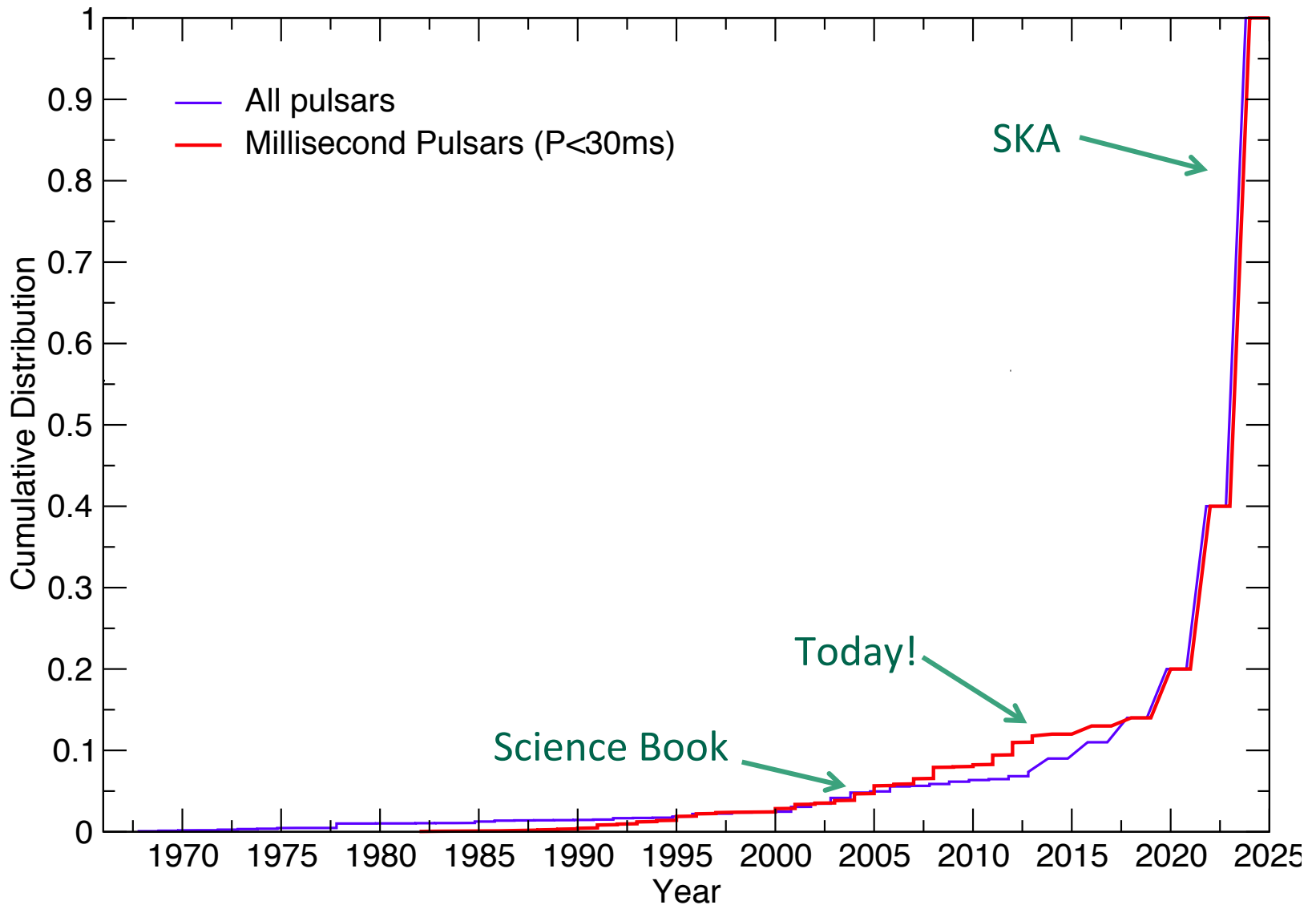
Radio Intensity



パルサー観測の歴史



パルサー観測の今後



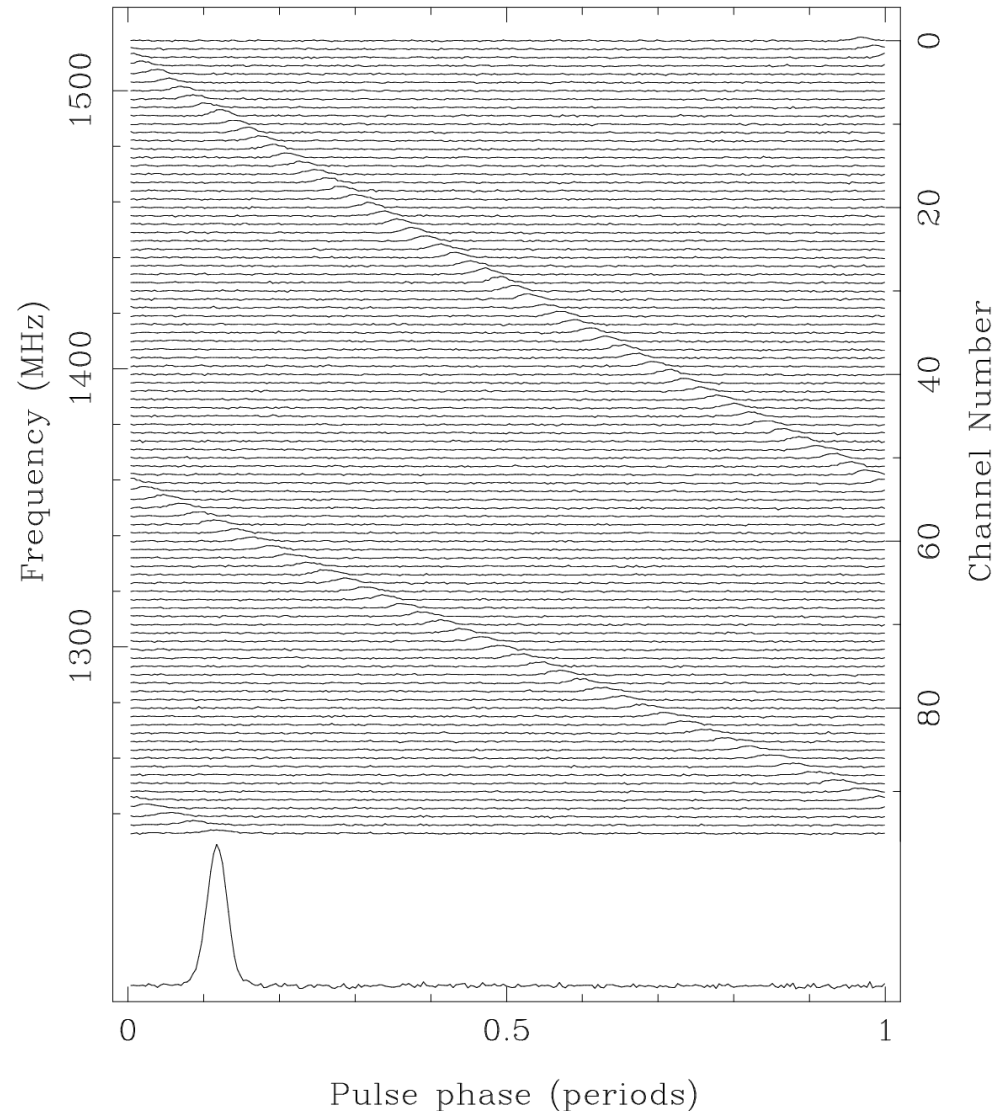
分散遅延

パルスの伝播中にプラズマ効果で周波数に応じて到着時刻が遅れる

$$\Delta t = \frac{q^2}{2\pi m_e c} \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) DM$$

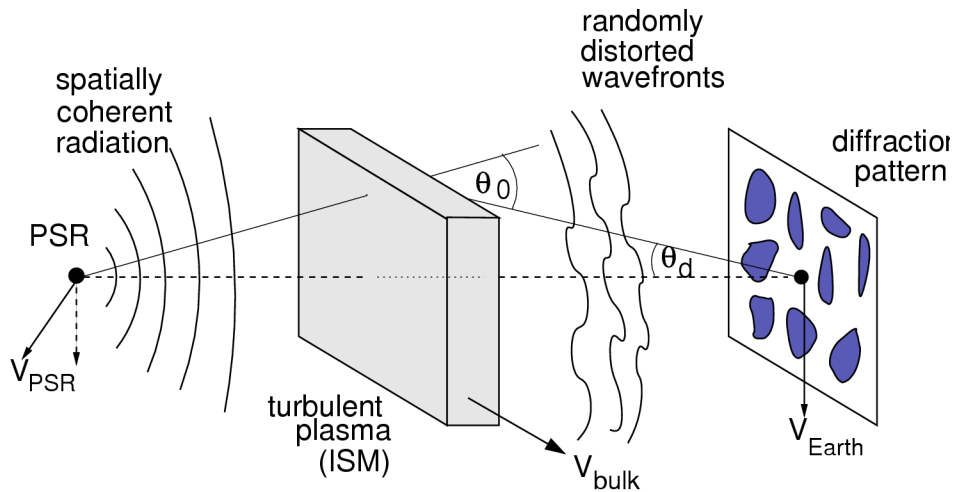
$$DM = \int_0^x n_e dx$$

低周波ほど遅延が大きい

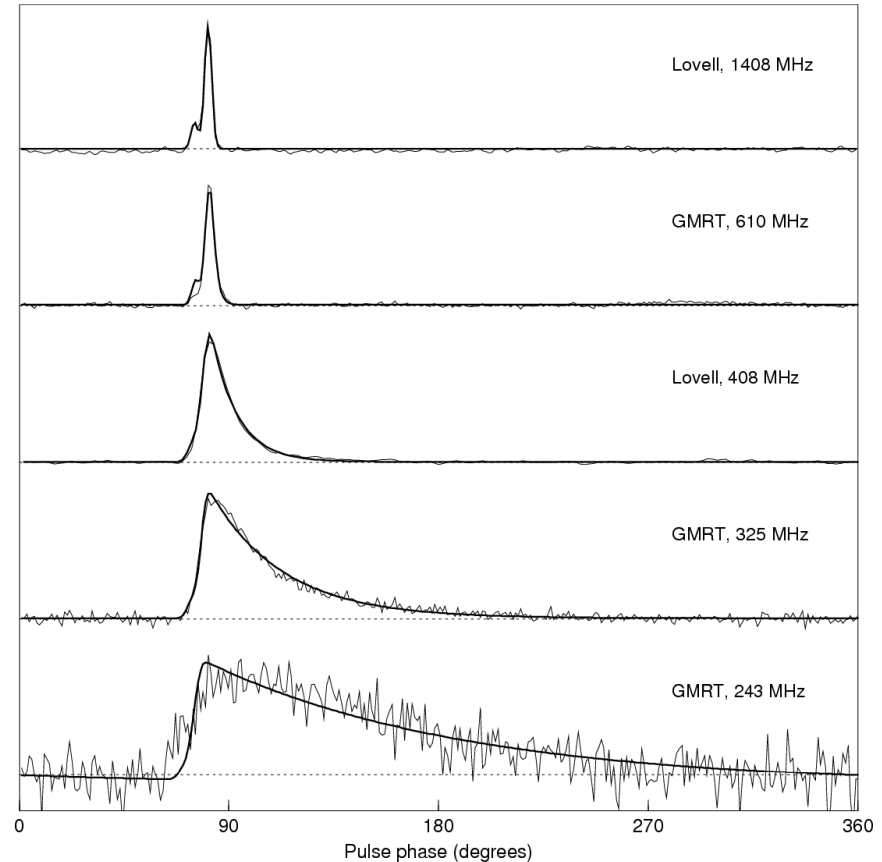


散乱

パルスの伝播中にISMに
散乱されて経路が歪み
パルス幅が広がる



the handbook of pulsar astronomy



低周波ほど効果が大きい

SKAによるpulsar観測

観測戦略

- ・ 低周波の方が明るい
 - ・ 低周波で遅延、散乱が大きい
- 銀河面は高周波、面外は低周波

SKAによるパルサー観測

全天サーベイ

- ・ SKA-mid銀河面サーベイ
- ・ SKA-low銀河面外サーベイ

ターゲット観測

- ・ 銀河系中心
- ・ 球状星団
- ・ 系外銀河
- ・ タイミング観測（ミリ秒パルサー）
- ・ Fermi未同定天体

SKAによるpulsar観測

SKA1サーベイ

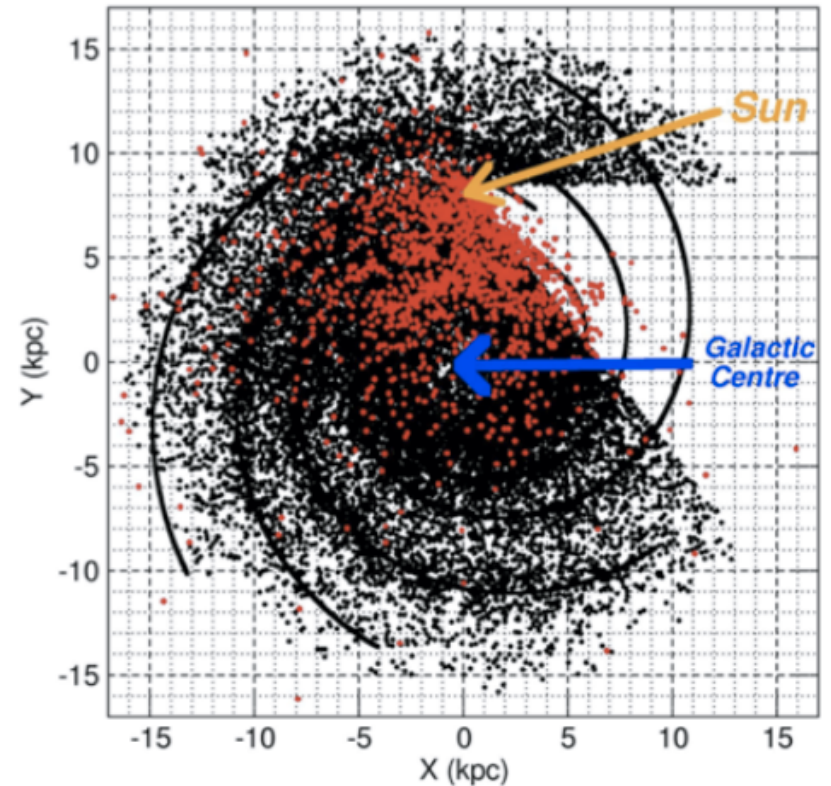
- 9,000 normal pulsars
- 1,400 millisecond pulsars

SKA2サーベイ

- 30,000 normal pulsars
- 3,000 millisecond pulsars

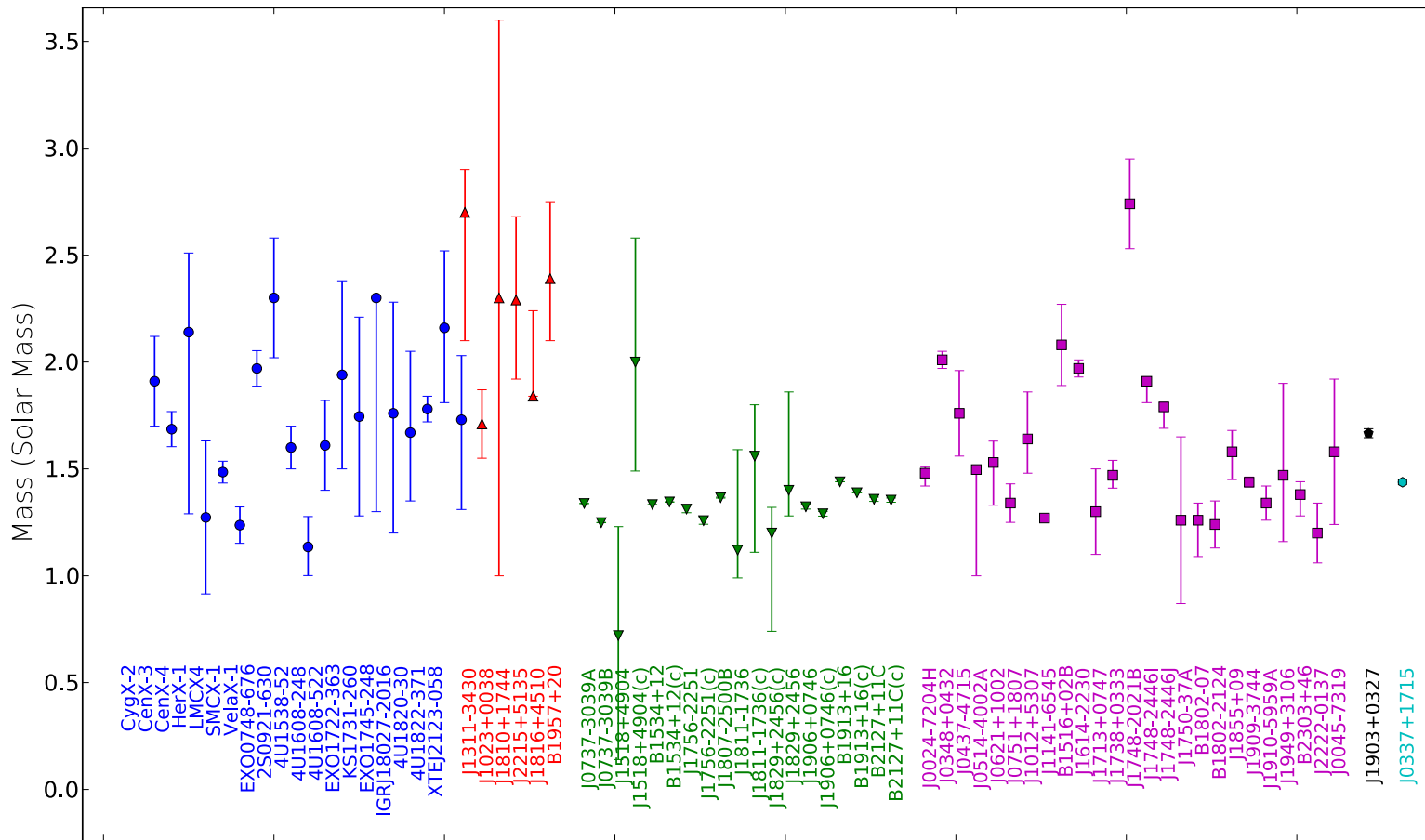
これだけたくさんあると・・・

- 統計
 - 光度関数
 - 質量関数
 - 空間分布
 - 周期分布
- 珍しいもの
 - 質量上限、下限
 - sub-msecパルサー
 - 惑星系
 - 珍しい連星



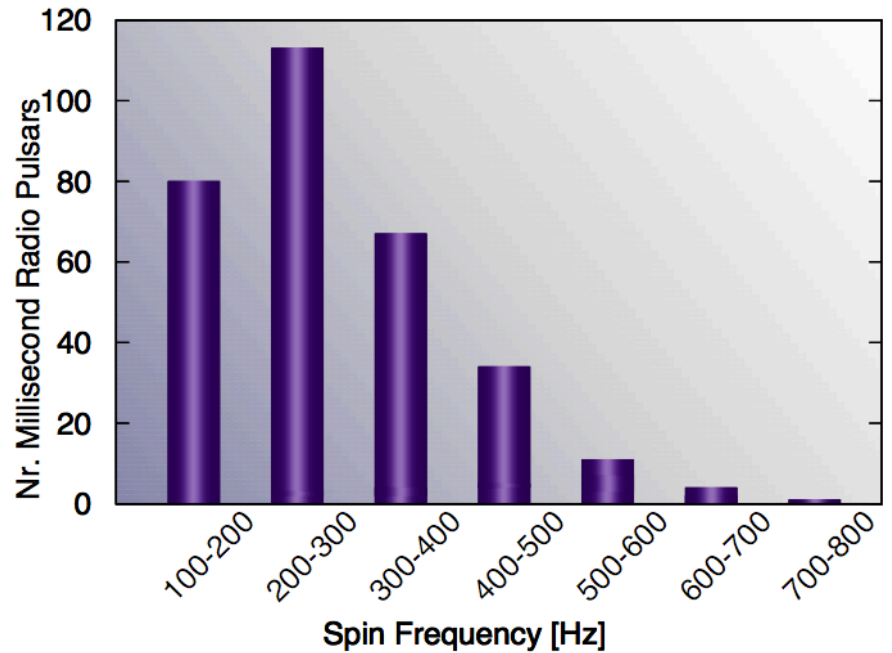
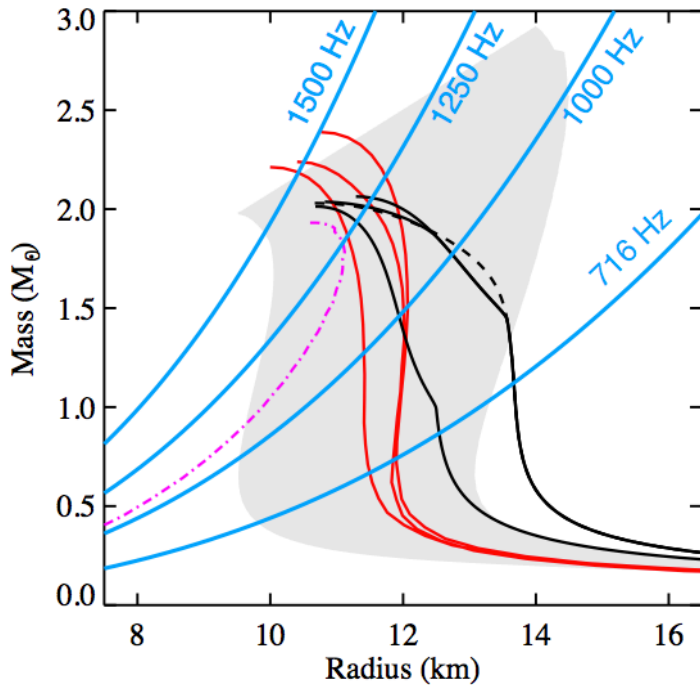
パルサー質量

- 質量関数
 - 最軽量
 - 最重量
- } 中性子星形成の物理
 → 状態方程式



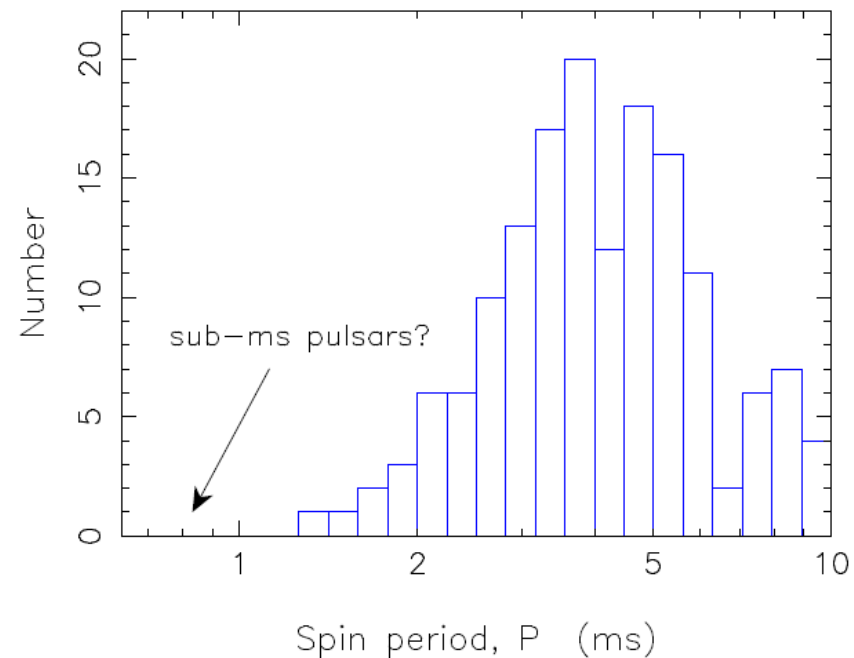
パルサー周期

- 周期分布 → パルサー進化
- 最高速 → 状態方程式



球状星団パルサー

- ミリ秒パルサーが多い
 - normal: 2200 \Leftrightarrow 144
 - millisecond: 250 \Leftrightarrow 130
- 高い星密度 ($\sim 1000\text{pc}^{-3}$)
星同士の相互作用が頻繁
 - バイナリーが多い
 - バイナリー組み替え
 - 変なシステムができる \rightarrow
 - 何回もrecyclingが
起こる
 - \rightarrow sub-millisecond?
- 中心にIMBH?



GCs could create some very strange creatures



MSP-MSP binary



MSP-BH binary



sub-MSP



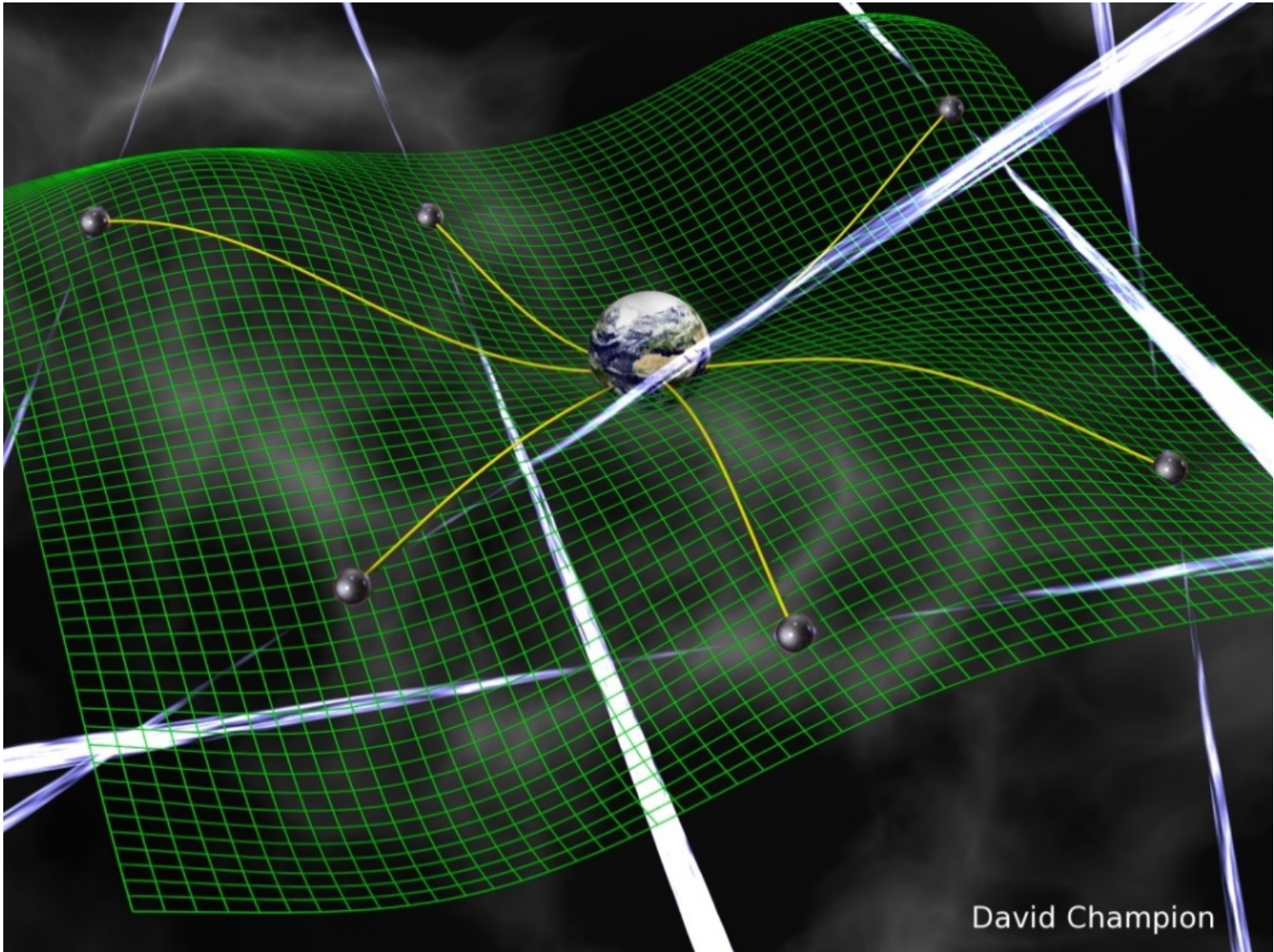
SKA pulsar science

- パルサー国勢調査
 - 基礎物理の探求
 - 強重力での相対論検証
 - 重力波直接検出
 - 核物質の状態方程式
 - パルサー磁気圏
 - パルサー風
 - 中性子星の誕生、進化
 - 銀河系の構造（ガス・磁場）
 - 銀河間ガス
- SKA highlights
- 比較的手薄

日本が活躍するチャンス！

4、重力波直接検出

pulsar timing array



David Champion

pulsar timing array

原理：重力波が通過すると地球とパルサーの時空の変化でパルスの到達するタイミングがずれる

重力波周波数：観測頻度と観測期間で決まる
(1日)⁻¹ ∼ (数年)⁻¹

→ 0.1μHz ∼ 1nHz

→ 巨大BHバイナリー、宇宙ひも

感度：10nsecの精度でタイミング観測、10年継続

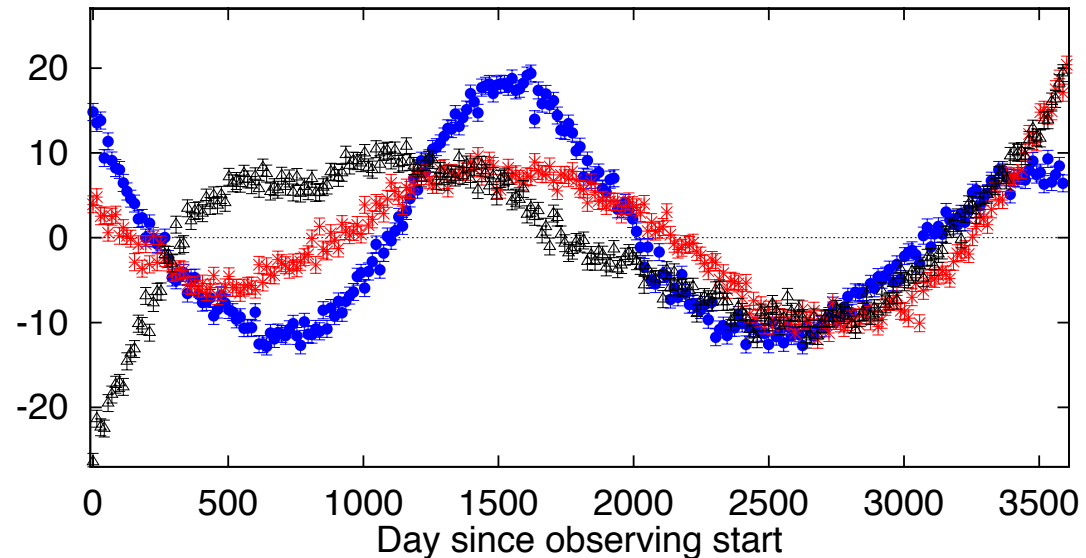
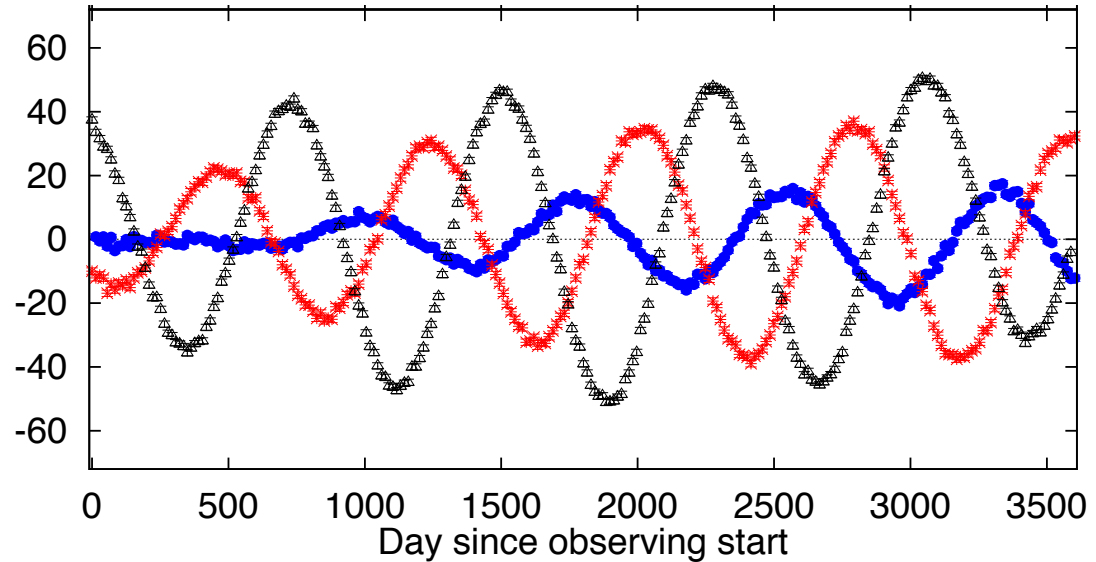
→ 10 ns/ 10 yr ∼ 3×10⁻¹⁶

pulsar timing array

timing residual:

重力波がないと仮定した
タイミングモデルからの
ずれ

上：シングルソース
下：背景重力波
(パルサーと波源の
位置関係で変わる)



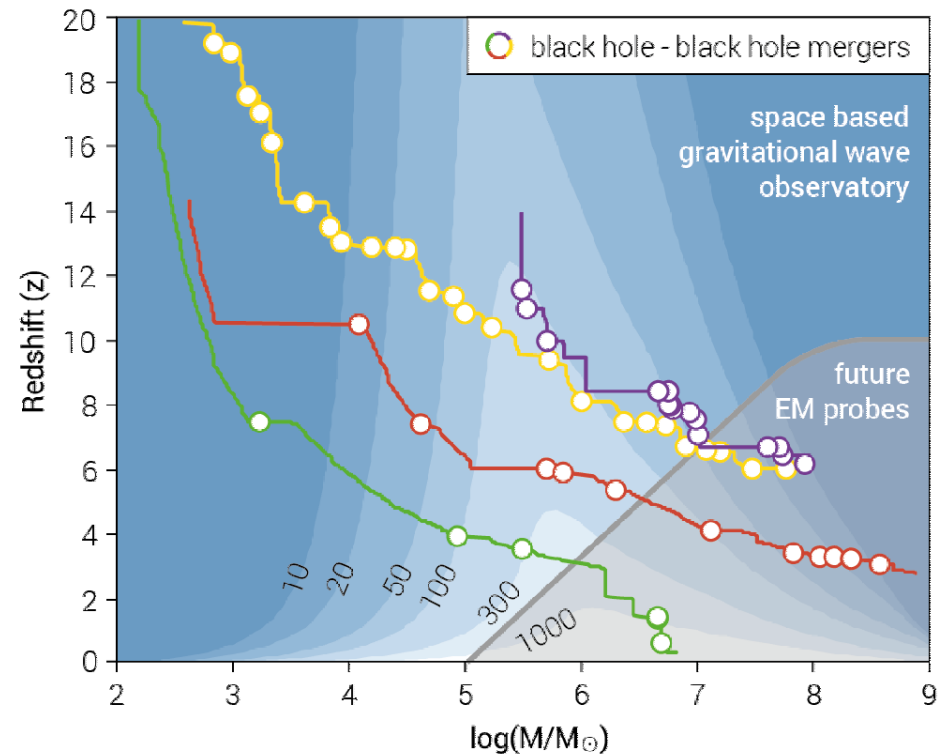
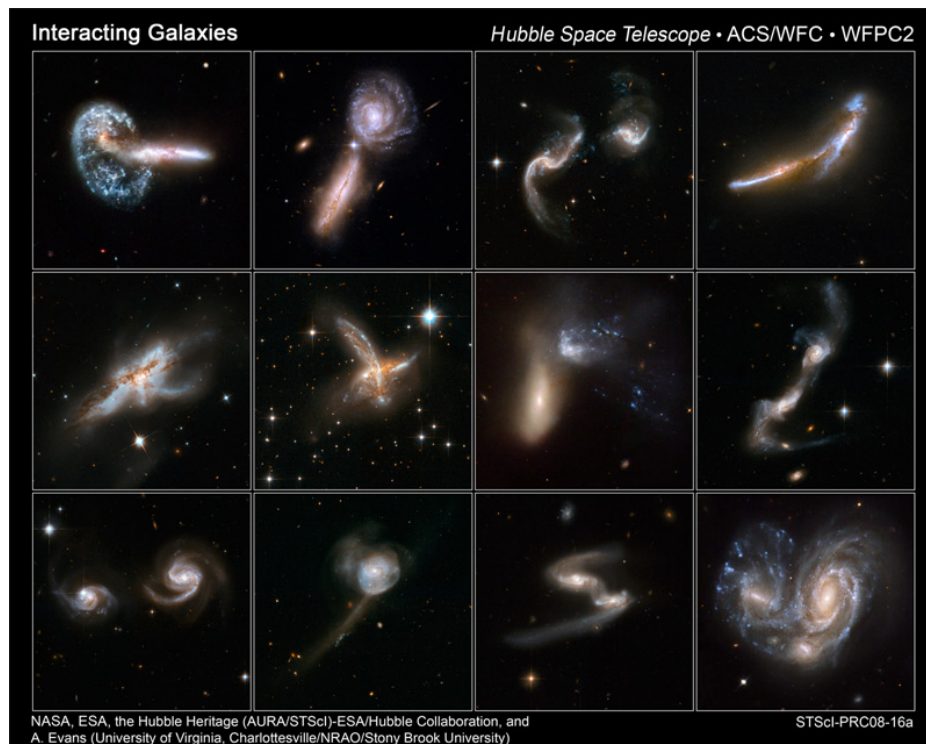
銀河衝突とSMBH

銀河衝突

- SMBH binary形成
- 重力波放出・合体
- 背景重力波

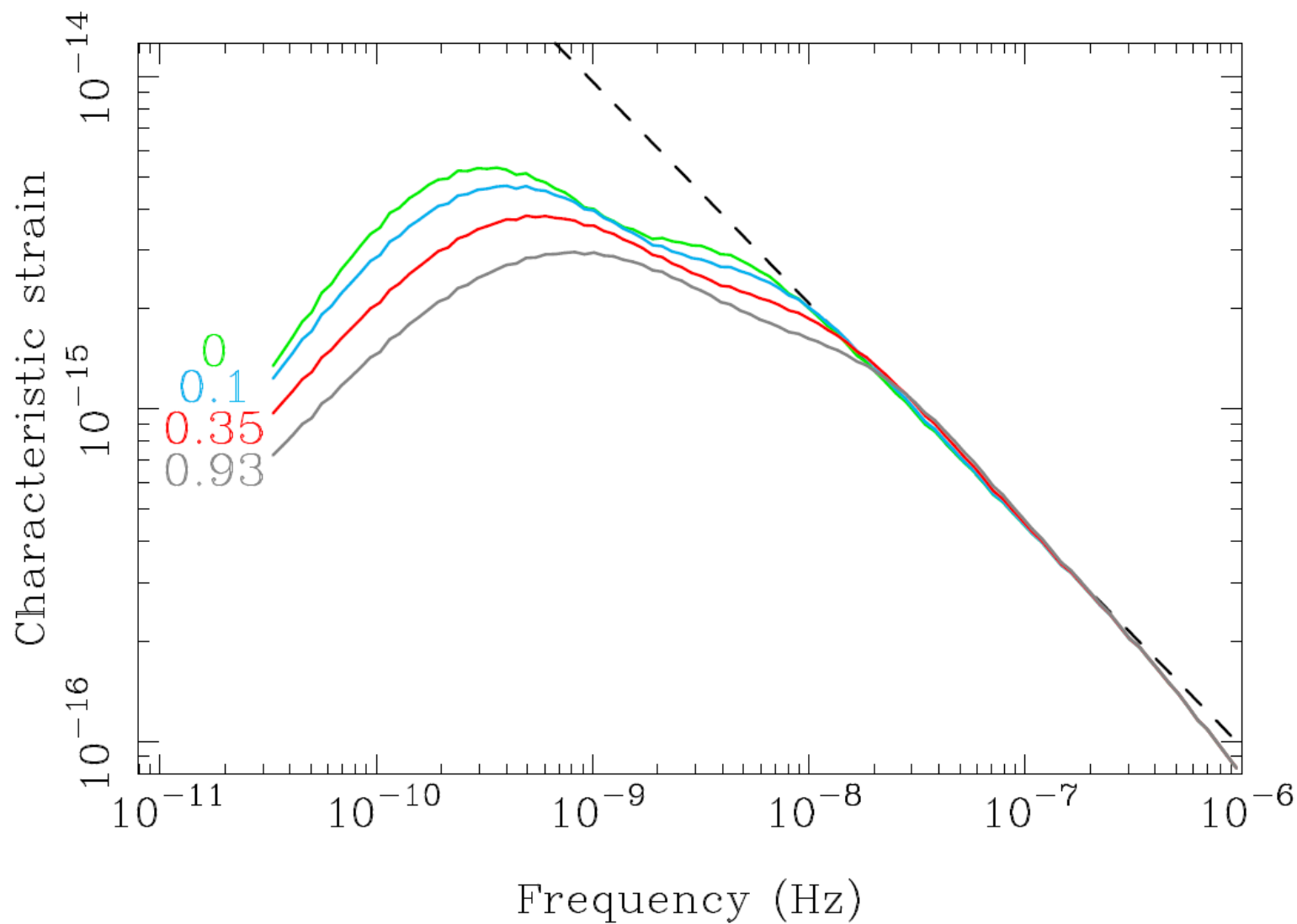
Sesana 2013

BH mergerシミュレーション



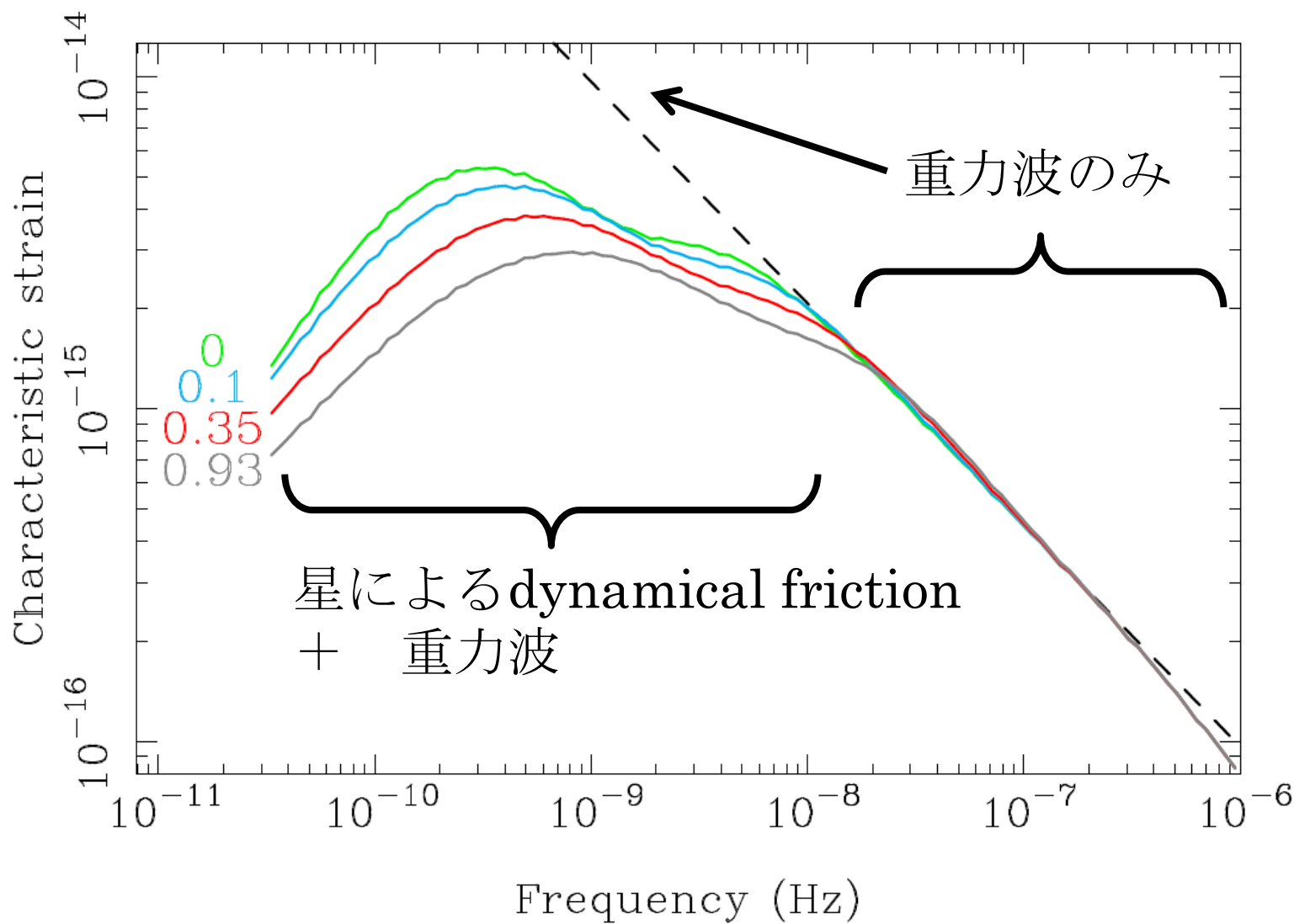
背景重力波スペクトル

Ravi et al. 2014



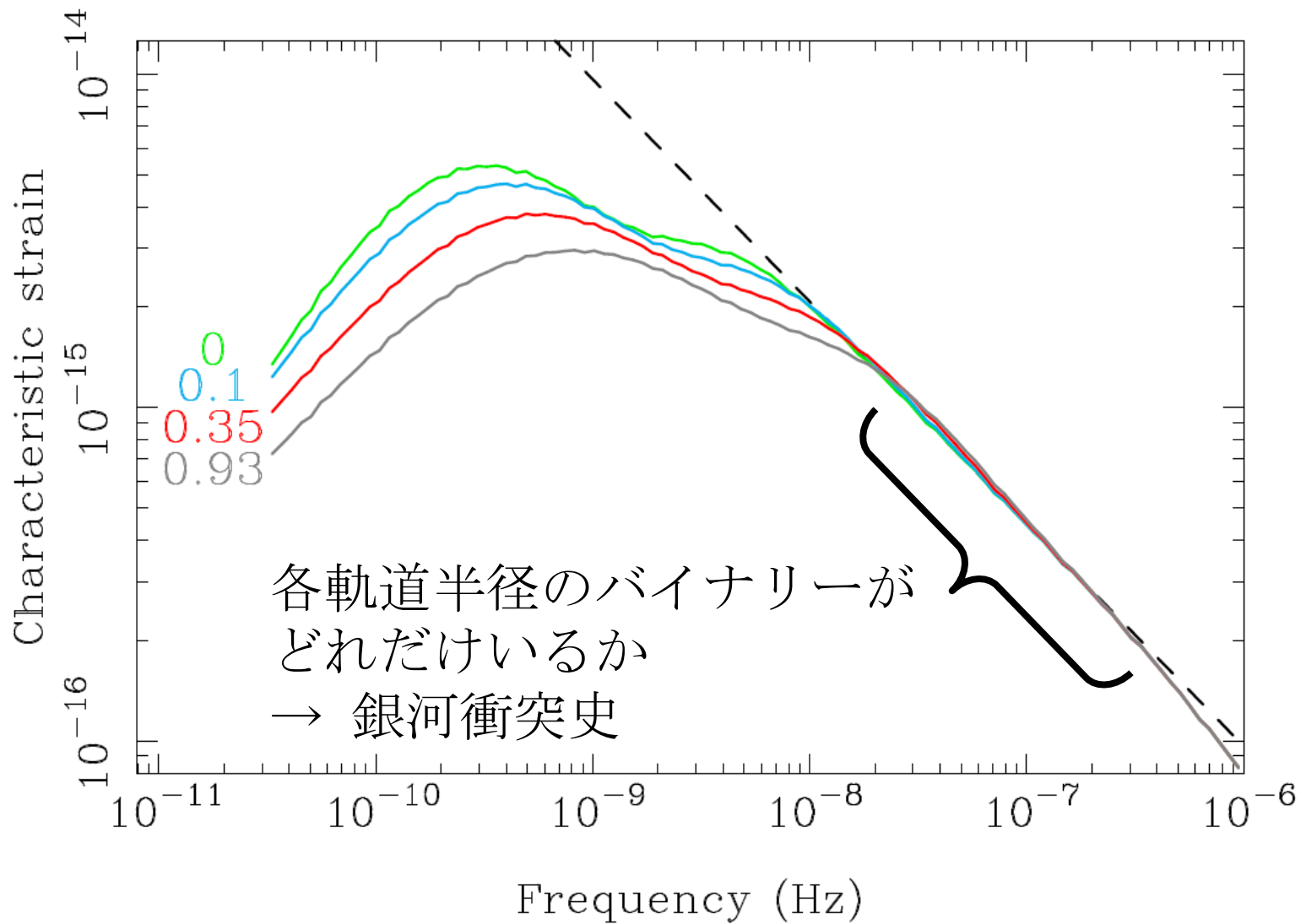
背景重力波スペクトル

Ravi et al. 2014



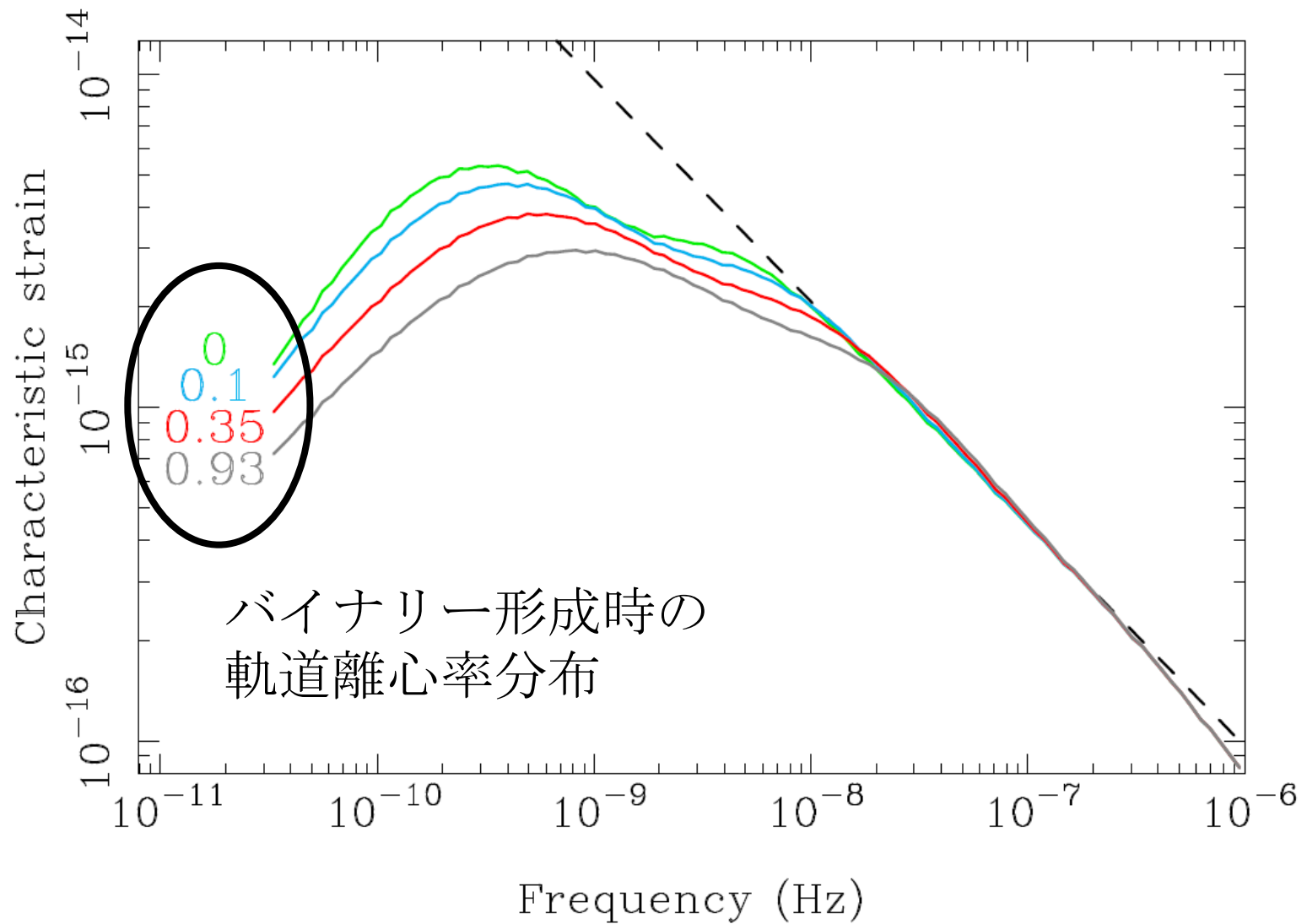
背景重力波スペクトル

Ravi et al. 2014



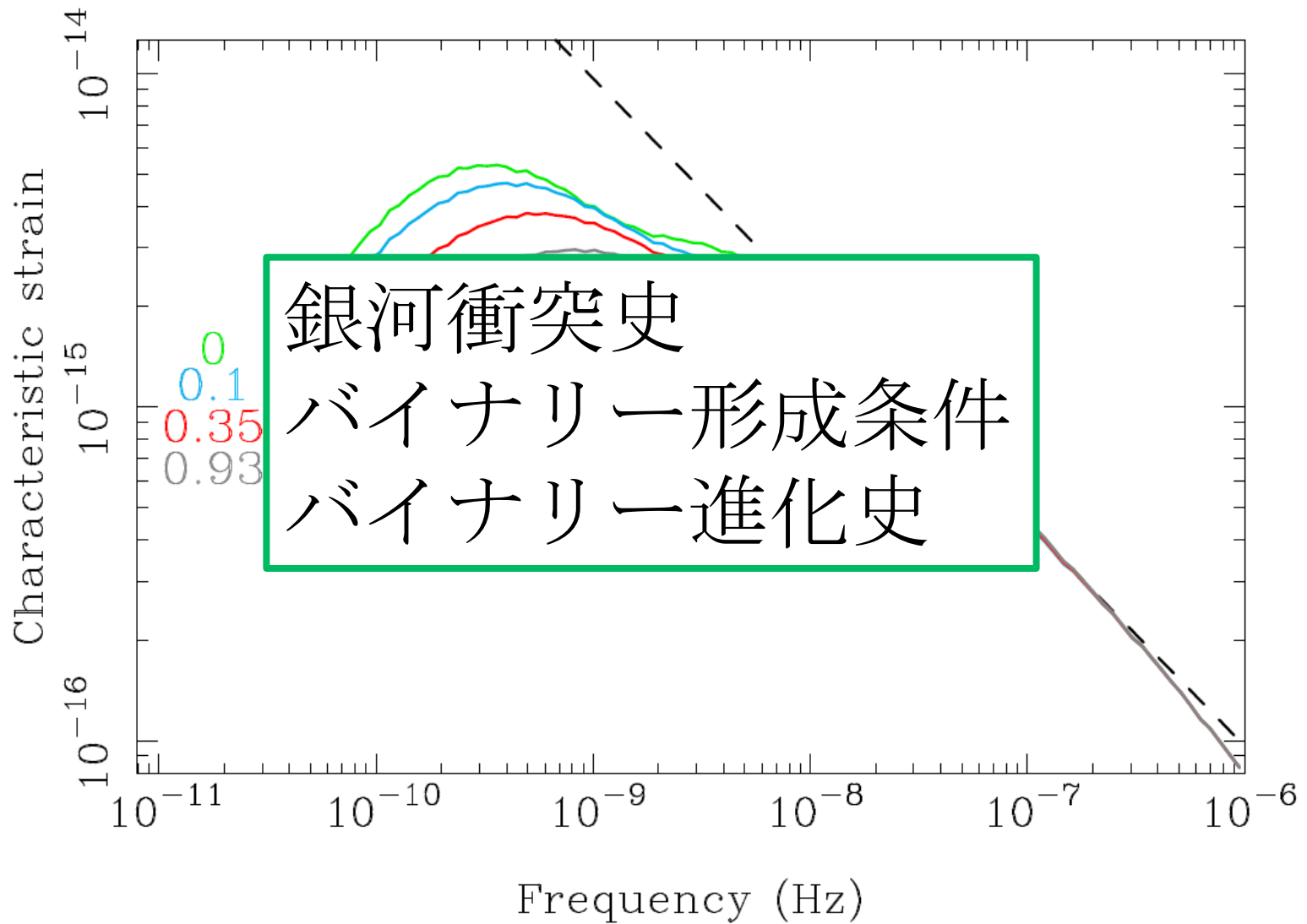
背景重力波スペクトル

Ravi et al. 2014



背景重力波スペクトル

Ravi et al. 2014



現在のPTA

3つグループ

- ・ PPTA (豪)
- ・ EPTA (欧)
- ・ NANOGrav (米)

コンソーシアム → IPTA



PPTAデータ



Shannon et al. 2015
Parkes PTA

4つのパルサーの
10年に渡る観測を
用いて現在最も厳しい
上限を与える。

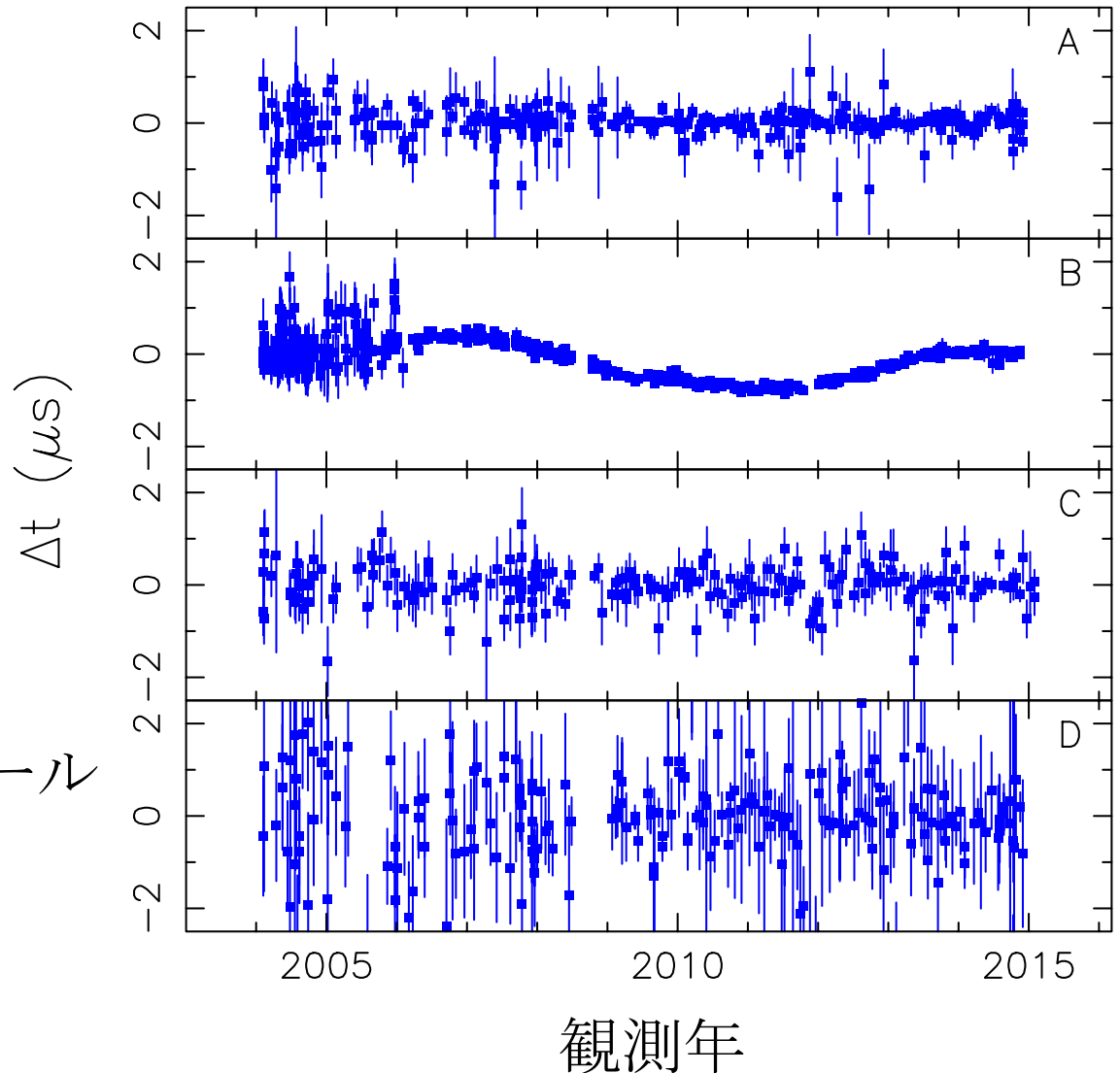
error $\sim 1 \mu\text{sec}$!

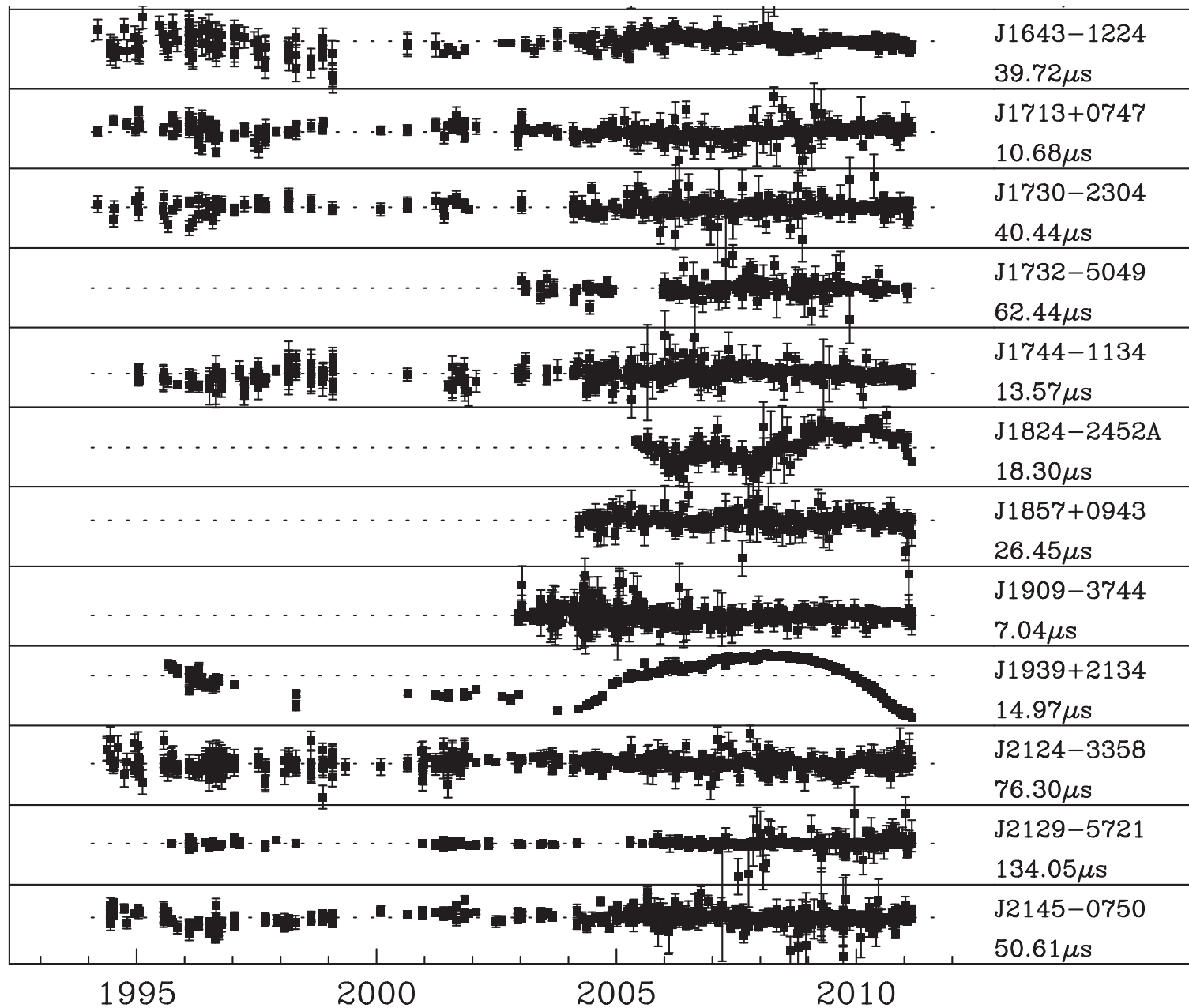
red noise:

正体不明の長時間スケール
のノイズ

パルサー? 星間空間?

太陽系? 観測装置?



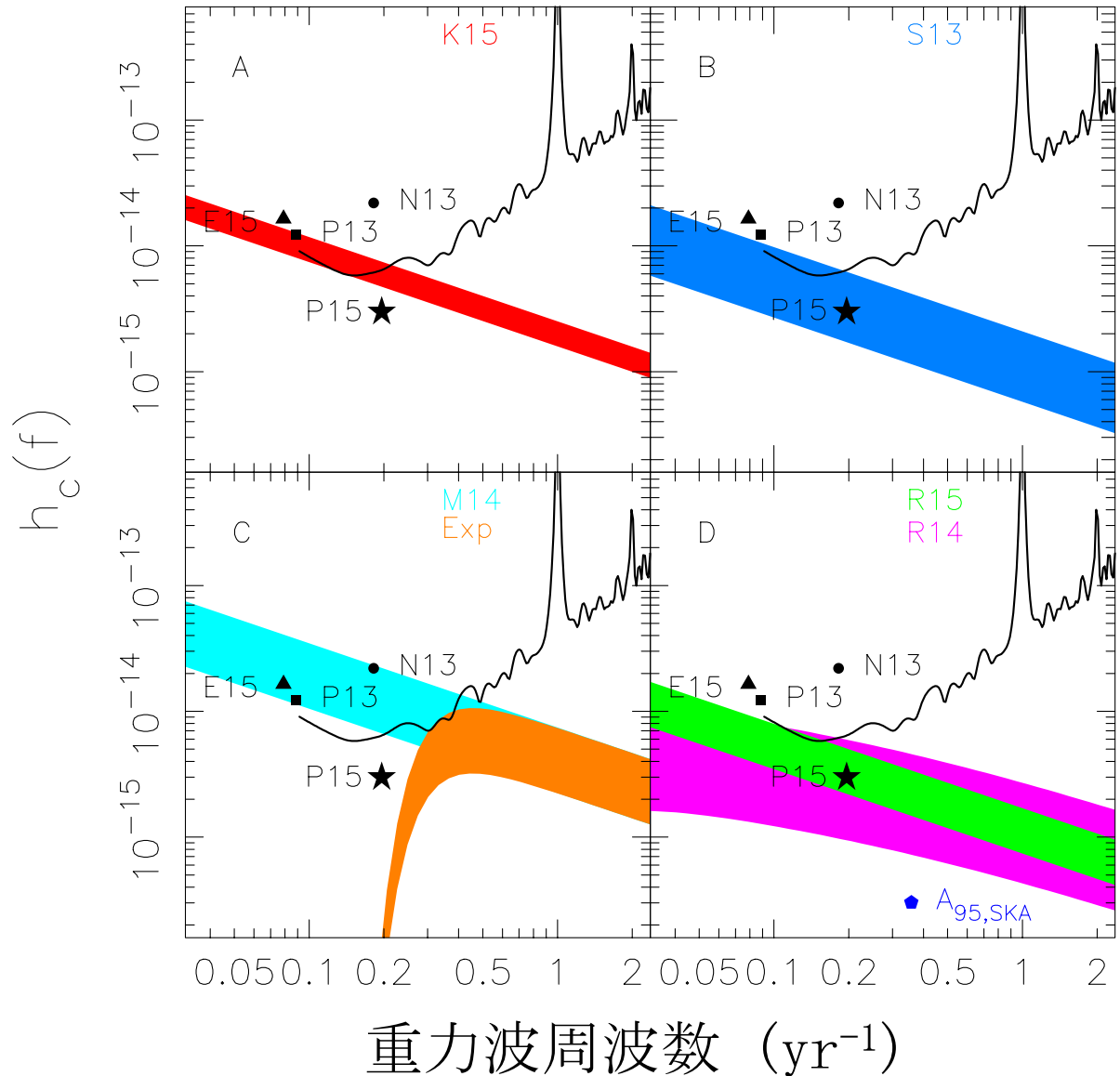


これなにか考えてください！

PPTAデータ解析

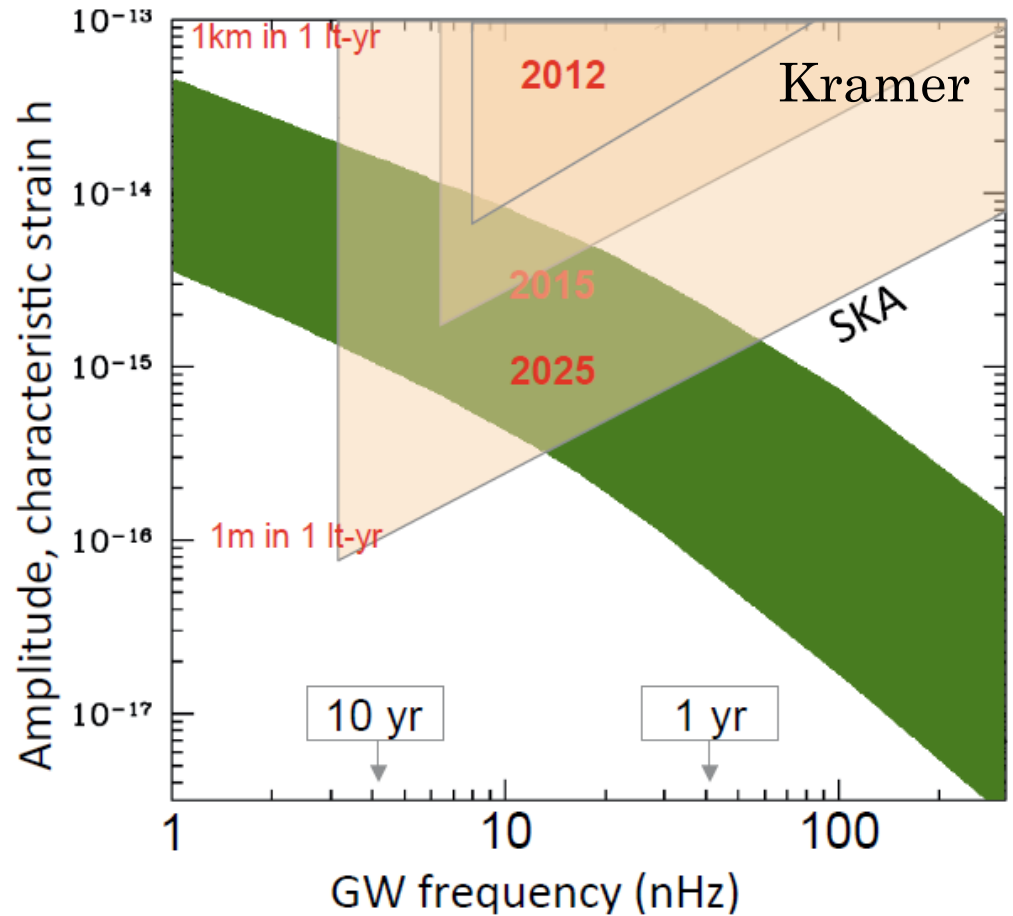


Shannon et al. 2015
Parkes PTA
背景重力波モデルに
不定性はあるが
最もシンプルな
モデルは棄却した。



感度予想

- SKA以前に検出される可能性はある
- SKA1なら確実
- ナノヘルツ重力波検出前夜！



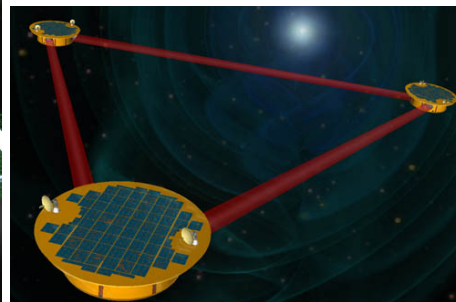
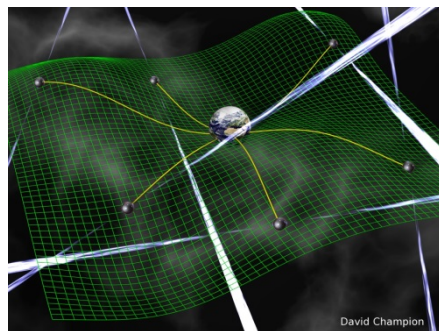
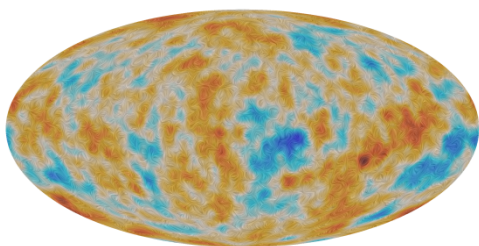
多波長重力波天文学

CMB

PTA

宇宙干渉計

地上干渉計



10^{-17}Hz

$\sim 1\text{nHz}$

$1\text{mHz}-0.1\text{Hz}$

100Hz



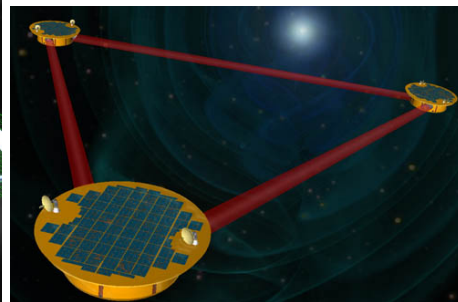
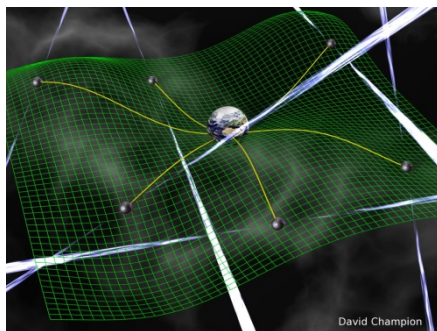
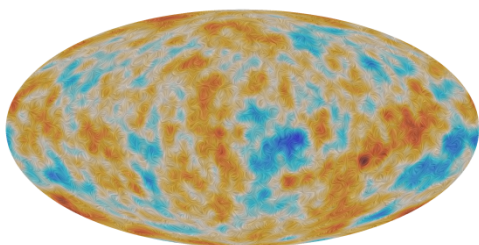
多波長重力波天文学

CMB

PTA

宇宙干渉計

地上干渉計



巨大BH連星

超新星爆発

コンパクト天体連星

宇宙ひも

原始重力波

10^{-17}Hz

$\sim 1\text{nHz}$

$1\text{mHz}-0.1\text{Hz}$

100Hz



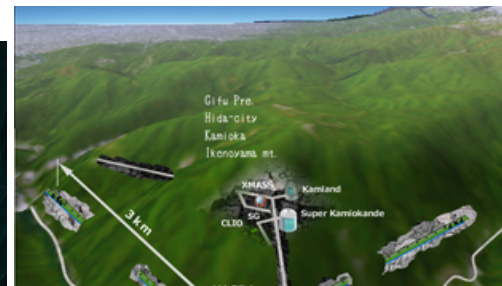
多波長重力波天文学

CMB

PTA



地上干渉計



KAGRA

巨大BH連星

コンパクト天体連星

宇宙ひも

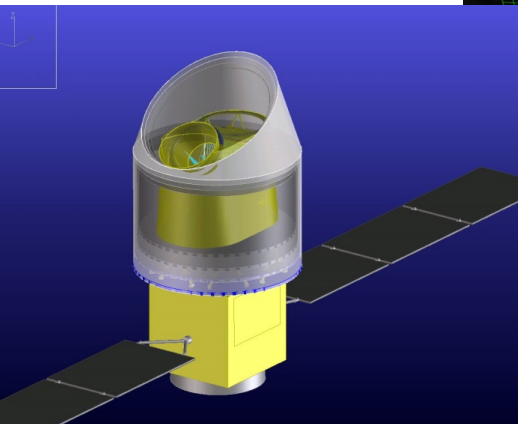
原始重力波

10^{-17}Hz

$\sim 1\text{nHz}$

$1\text{mHz}-0.1\text{Hz}$

100Hz

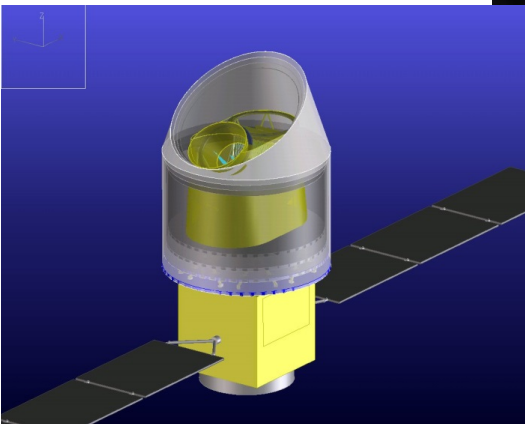
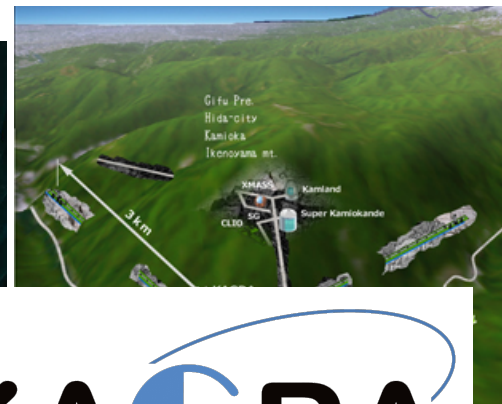
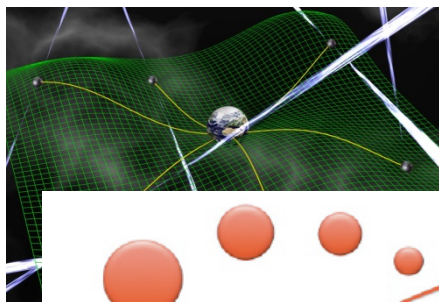
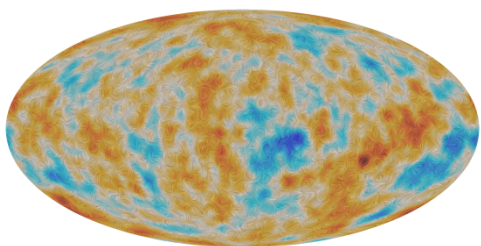


多波長重力波天文学

CMB

PTA

地上干渉計



10^{-17} Hz

~ 1 nHz



日本のサイエンス

パルサーのVLBI観測による距離決定

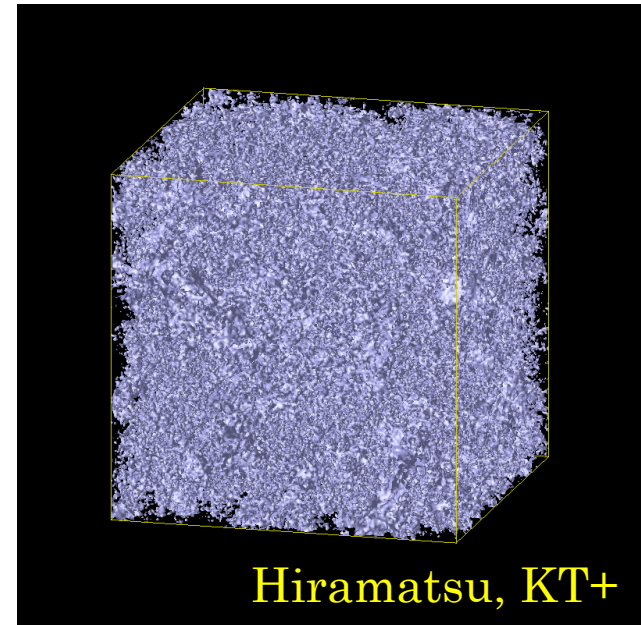
- ・ 感度、角度分解能の大幅向上
(距離を知らないと分解能 ~ 40 平方度)
- ・ パルサーによる銀河系マップ作り
(VERAの拡張)

サブナノヘルツ重力波検出

Yonemaru, KT+ 2016, 2017

宇宙ひもからの重力波探索

Kuroyanagi, KT+ 2017



5、一般相對論檢証

相対論の検証

銀河系中心巨大ブラックホールを用いて一般相対論を検証

相対論の検証

銀河系中心巨大ブラックホールを用いて一般相対論を検証

●修正重力理論

・暗黒物質・暗黒エネルギー

「既成の理論＋変なもの」 vs 「新理論＋普通のもの」

- 水星の近日点移動
- 海王星の発見

相対論の検証

銀河系中心巨大ブラックホールを用いて一般相対論を検証

●修正重力理論

- ・暗黒物質・暗黒エネルギー

「既成の理論+変なもの」 vs 「新理論+普通のもの」

- 水星の近日点移動
- 海王星の発見
- ・マイクロな世界の重力：超ひも理論？余剰次元？
- ・Brans-Dicke理論
 - スカラー・テンソル理論
 - Horndeski理論
 - (スカラー場を含み運動方程式が2階になる
もっとも一般的な理論)

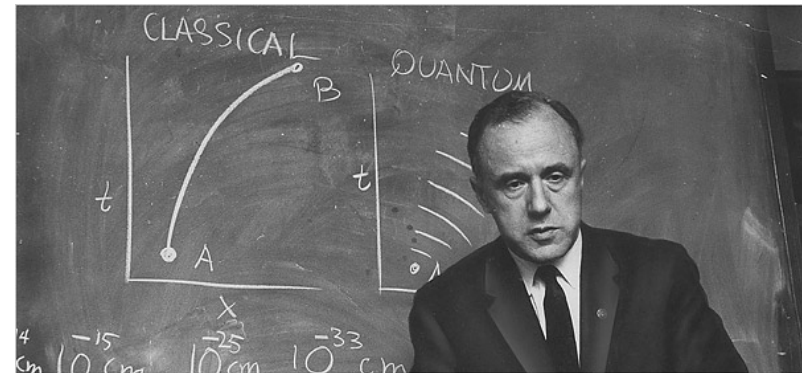
$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\zeta R - \eta (\nabla\phi)^2 + \beta G^{\mu\nu} \nabla_\mu \phi \nabla_\nu \phi - 2\Lambda \right]$$

相対論の検証

ブラックホールの基本的な定理

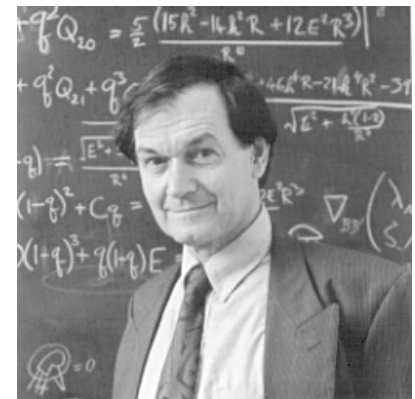
- no-hair theorem

ブラックホールの性質は質量、スピン、電荷だけで決まる



- cosmic censorship conjecture (Penrose)

- ブラックホールの回転速度が大きすぎると裸の特異点が出てしまい理論が破綻
 - 一般相対論の解としては存在する
 - 現実の宇宙ではそのような解は実現されないであろう
- ブラックホールの回転速度に上限



ブラックホールの形を測る

銀河中心の巨大ブラックホール近傍のパルサー (1mpc)

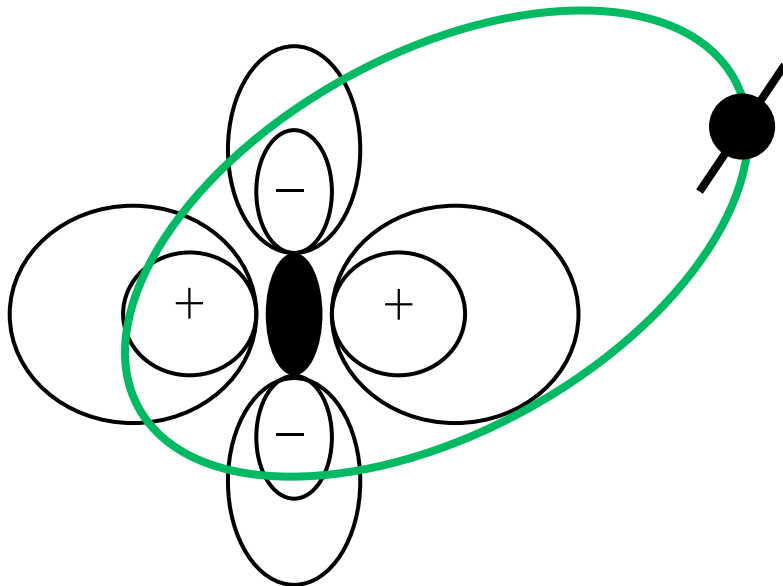
→ パルスのタイミング

→ パルサーの軌道要素

→ 巨大ブラックホールの質量、スピン、形 (四重極) を精密に測る

- 四重極は予言通りか？

- スピンは上限を超えていないか？



もっとも相対論らしいもので
相対論を検証する

銀河系中心にパルサーはある？

PSR J1745-2900

SgrA*から0.1pcに
マグネター！

銀河系中心から大量の
ガンマ線

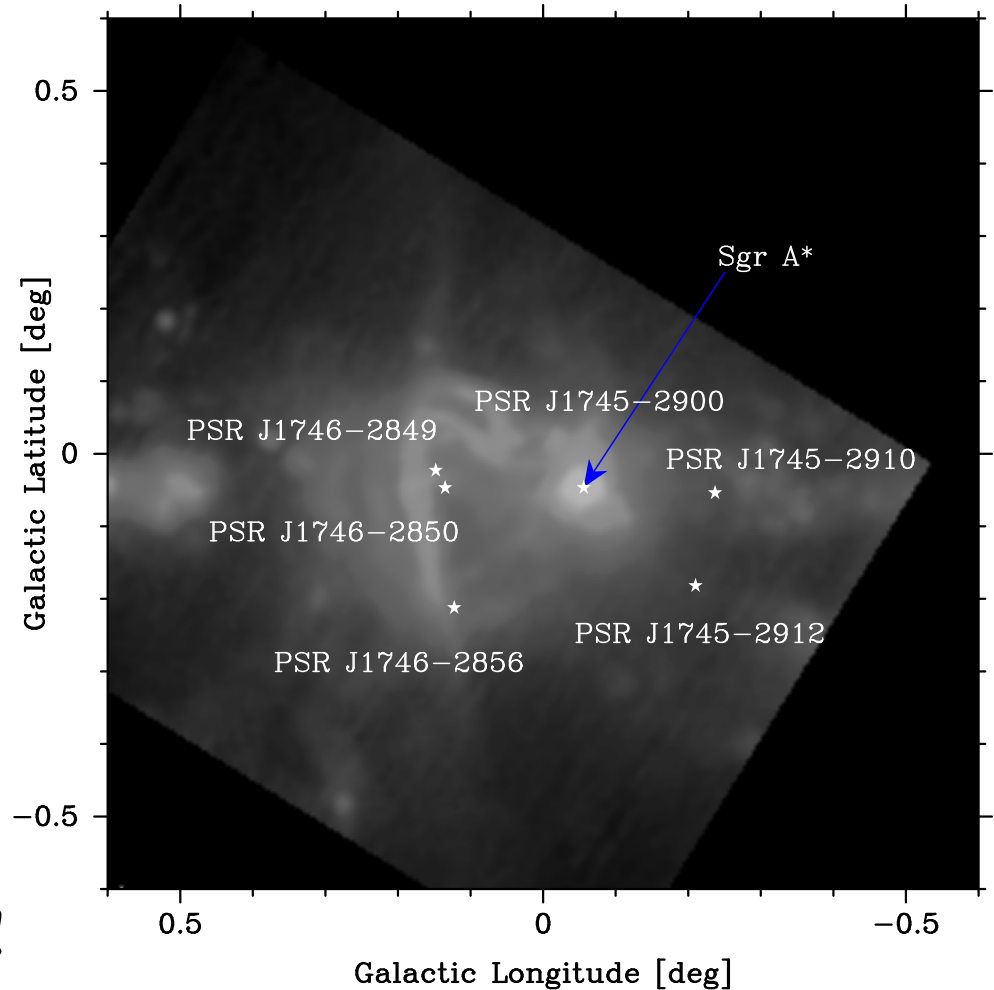
Wharton+ 2012

~ 1000 in (1pc)³

Zhang+ 2014

~ 200 in (0.01pc)³

誰か見積もってください！



7、まとめ

まとめ

SKA

- 究極の長波長電波望遠鏡
- 究極のパルサー望遠鏡
- 日本も参加に向け大きな一歩

SKAのパルサーサイエンス

- パルサー国勢調査
- パルサーを道具として（重力波・相対論検証）
- パルサーそのもの
→ 活躍の余地が大きい。チャンス！

メンバー募集中！

研究会案内

日本SKAパルサー・突発天体研究会

- 1/5-1/7@鹿島
- 2020年代のパルサー研究について議論
- 電波でなくても講演歓迎！
- 参加登録受付中！
- 詳しくはtennet

