

パルサー

高橋慶太郎

熊本大学

2015.3.4

国際パルサーチームメンバー

Ben Stappers	Univ. Manchester	United Kingdom	CO-CHAIR
Michael Kramer	MPIfR	Germany	CO-CHAIR
Sarah Buchner	SKA SA	South Africa	tier 1
David Champion	MPIFR	Germany	tier 1
Adam Deller	ASTRON	Netherlands	tier 1
JinLin Han	National Astron. Obs. China	China	tier 1
Yashwant Gupta	NCRA-TIFR	India	tier 1
George Hobbs	CASS	Australia	tier 1
Gemma Janssen	ASTRON	Netherlands	tier 1
Aris Karastergiou	Oxford University	United Kingdom	tier 1
Maura McLaughlin	West Virginia Univ.	USA	tier 1
Andrea Possenti	INAF	Italy	tier 1
Ingrid Stairs	U. British Columbia	Canada	tier 1
Gilles Theureau	CNRS-Orleans	France	tier 1

今井さん

国際サイエンスブック

“A Cosmic Census of Radio Pulsars” Evan Keane

“Understanding the Neutron Star Population” Vicki Kaspi

“Gravitational Wave Astronomy with the SKA” Gemma Janssen

“Tests of Gravity with Pulsars” LiJing Shao

“Radio Pulsars in the Galactic Center” Ralph Eatough

“Pulsars in Globular Clusters” Jason Hessels

“Probing the neutron-star interior and the cold dense-matter equation of state with the SKA” Renxin Xu

“Understanding the Pulsar Magnetosphere” Aris Karastergiou

“Structure and the Magnetoionic Interstellar Medium” Jinlin Han

“Pulsar Wind Nebulae” Joseph Gelfand

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 (APCTP)
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 (東京大宇宙線研)
成子篤 (東工大)
三上諒 (東京大宇宙線研)
米丸直之 (熊本大)
柳哲文 (名古屋大)

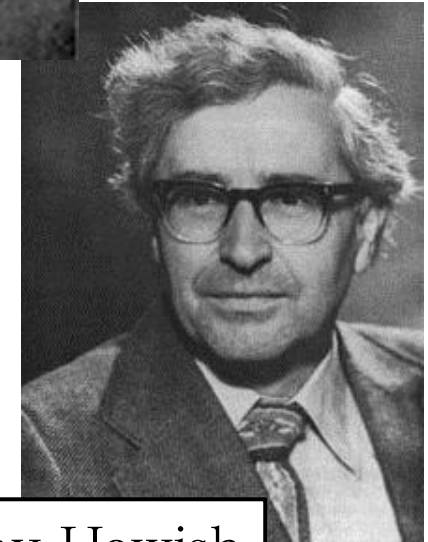
パルサー理論
パルサー観測
相対論
宇宙論
の混成チーム！

目次

- 1、イントロダクション
- 2、SKAによるパルサー観測
- 3、重力波直接検出
- 4、銀河系磁場構造
- 5、一般相対論検証（成子）
- 6、Giant Radio Pulses（三上）
- 7、まとめ

1、イントロダクション

Jocelyn Bell



Antony Hewish

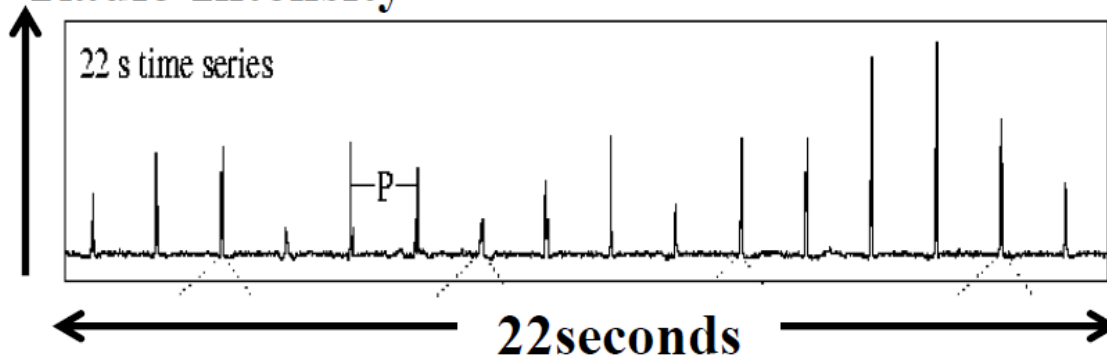
パルサー

- 周期的なパルス
- 周期：1msec - 10sec
- 正確な周期 → 宇宙の時計
- 現在2,000個程度発見

Pulses from a pulsar(PSR B0301+19)

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

Radio Intensity



Crab pulsar

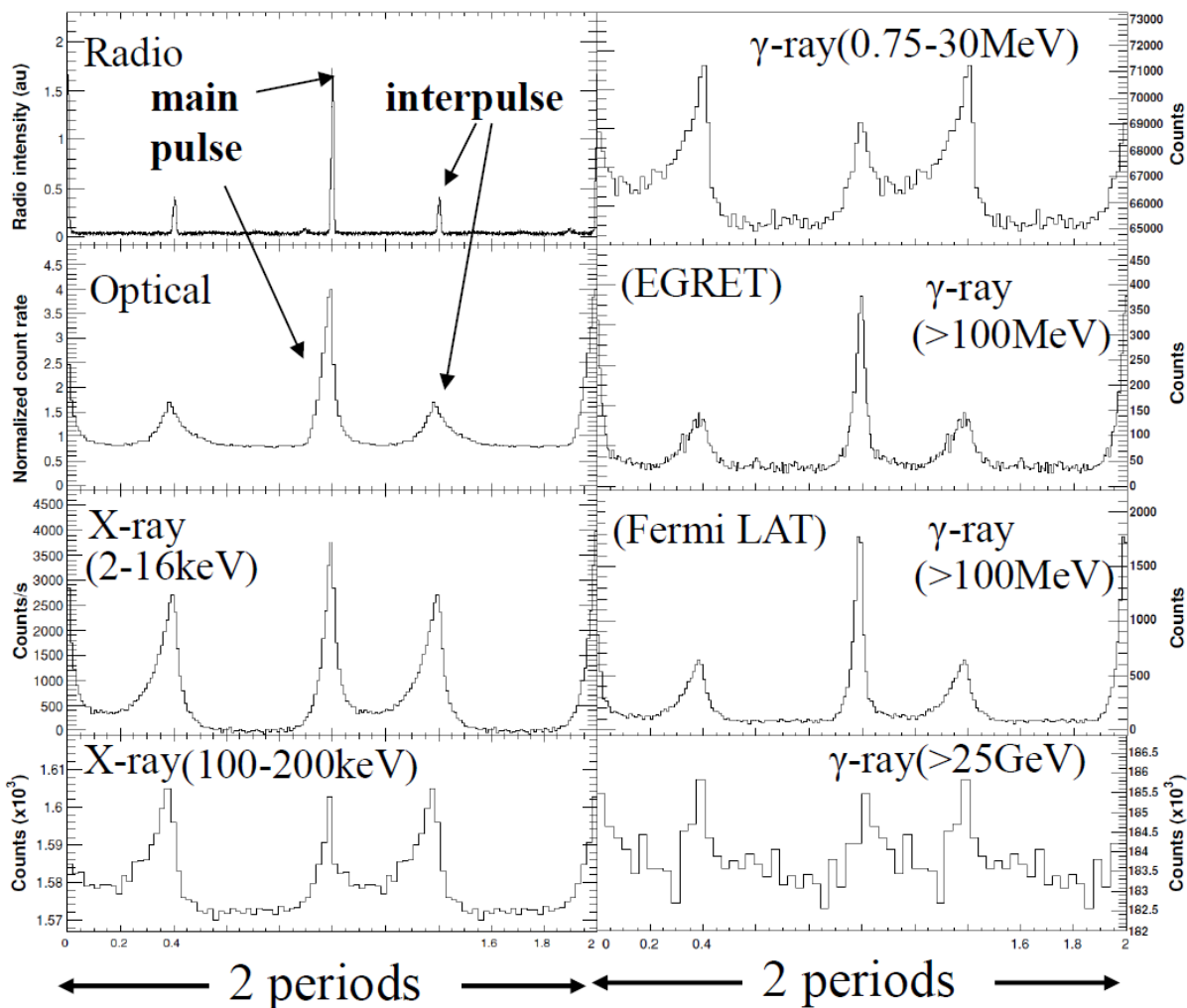
周期33msec (spin down: 38nsec/day)

SN1054の残骸に付随

電波～ガンマ線でパルス



Credit: J. Hester (ASU), CXC, NASA

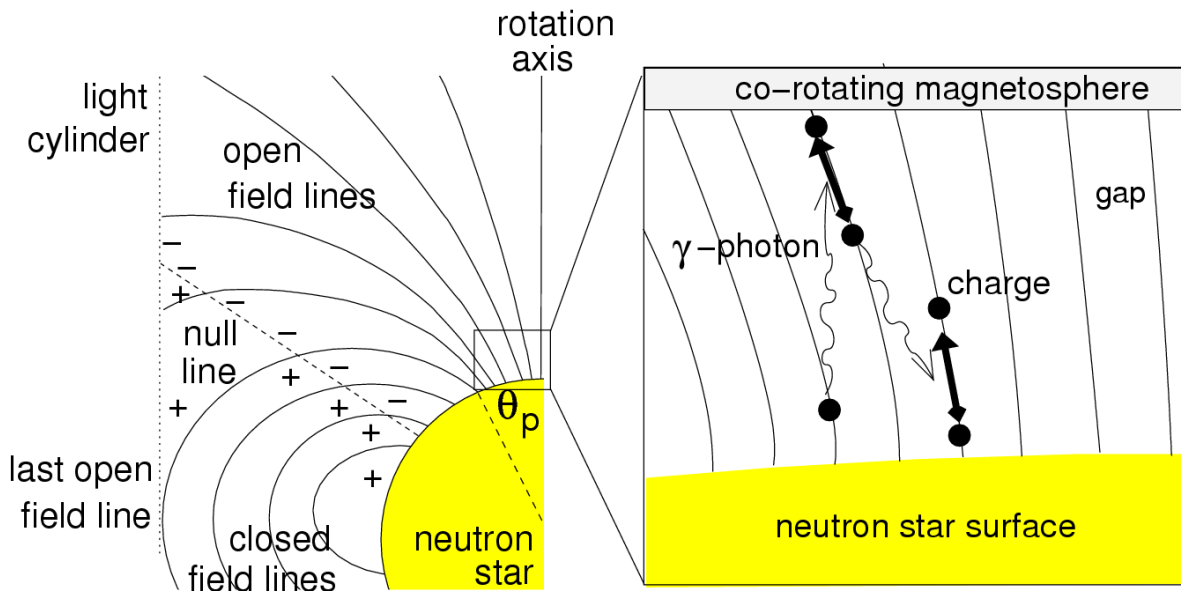
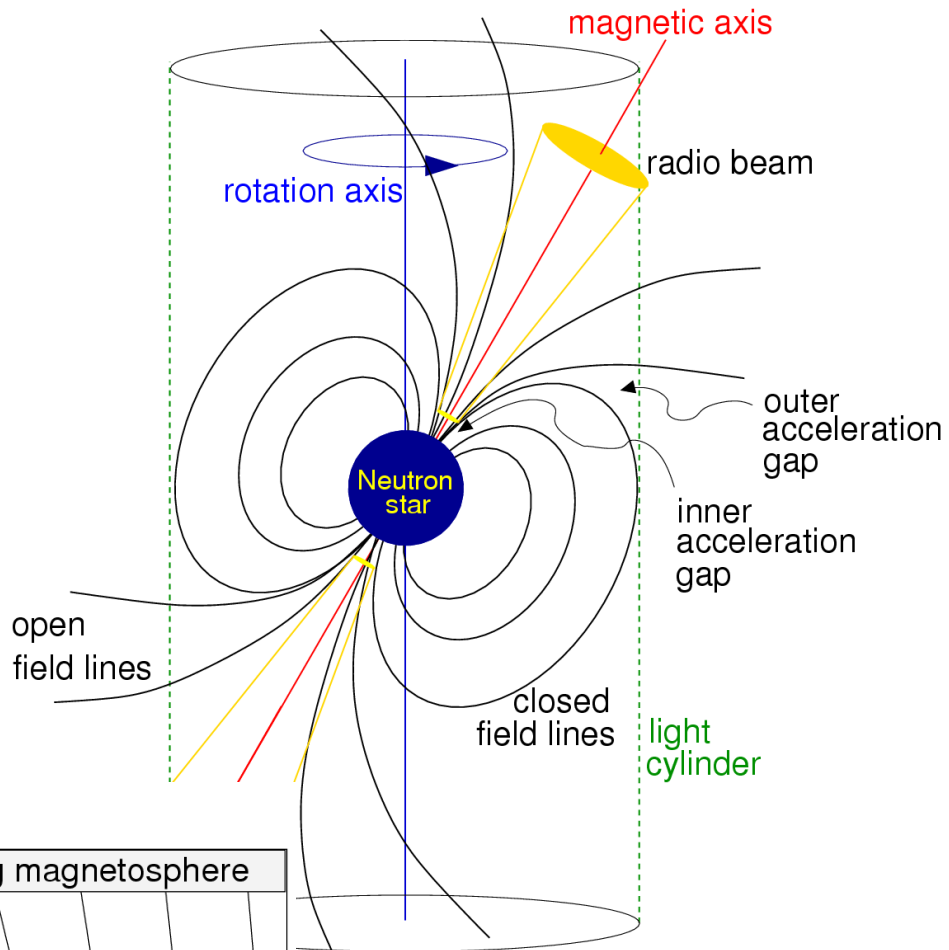


Abdo et al. (2010)

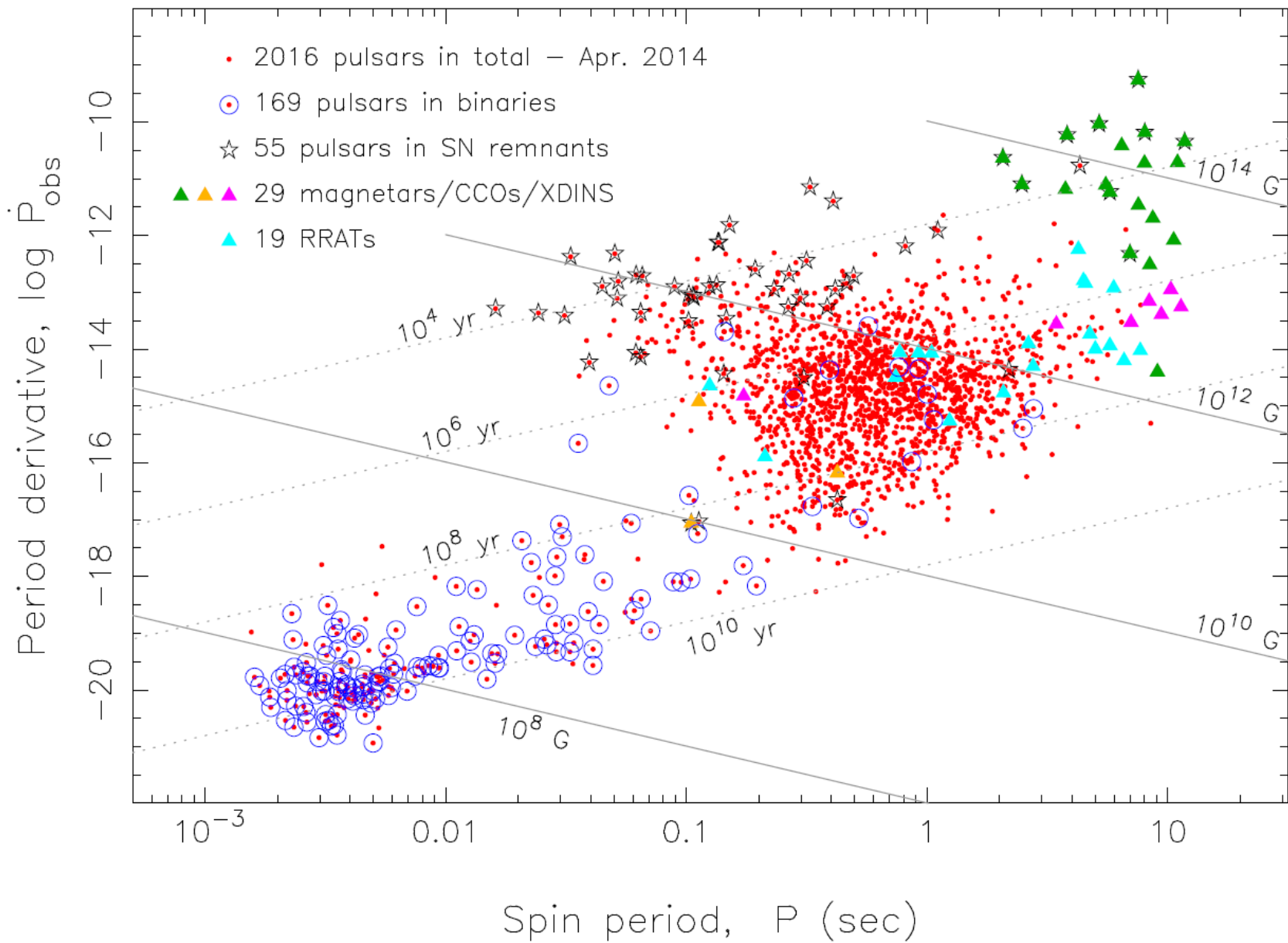
放射機構

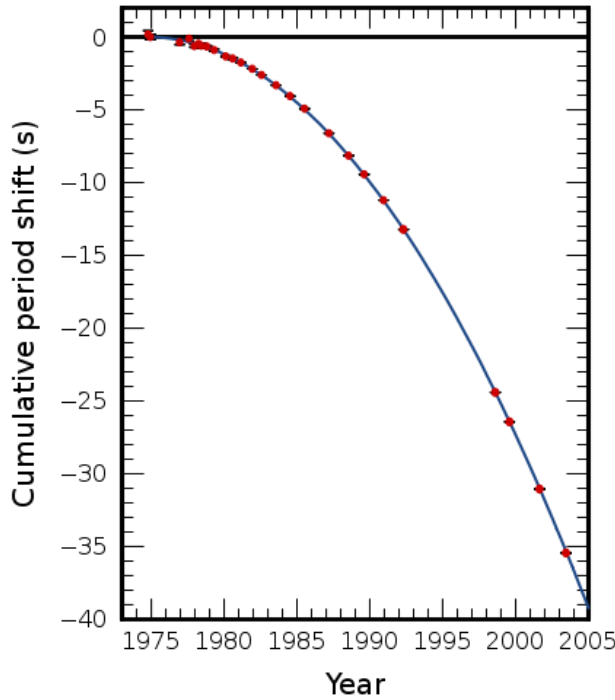
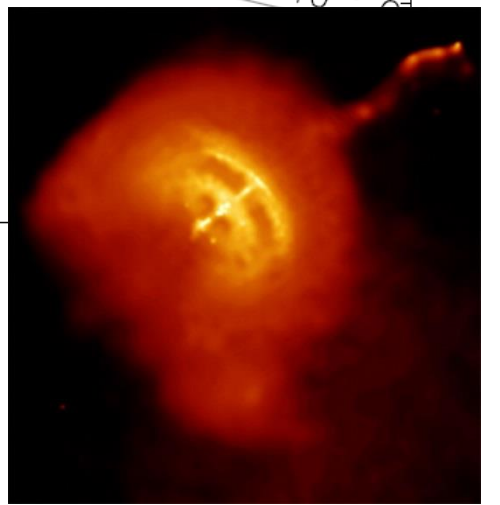
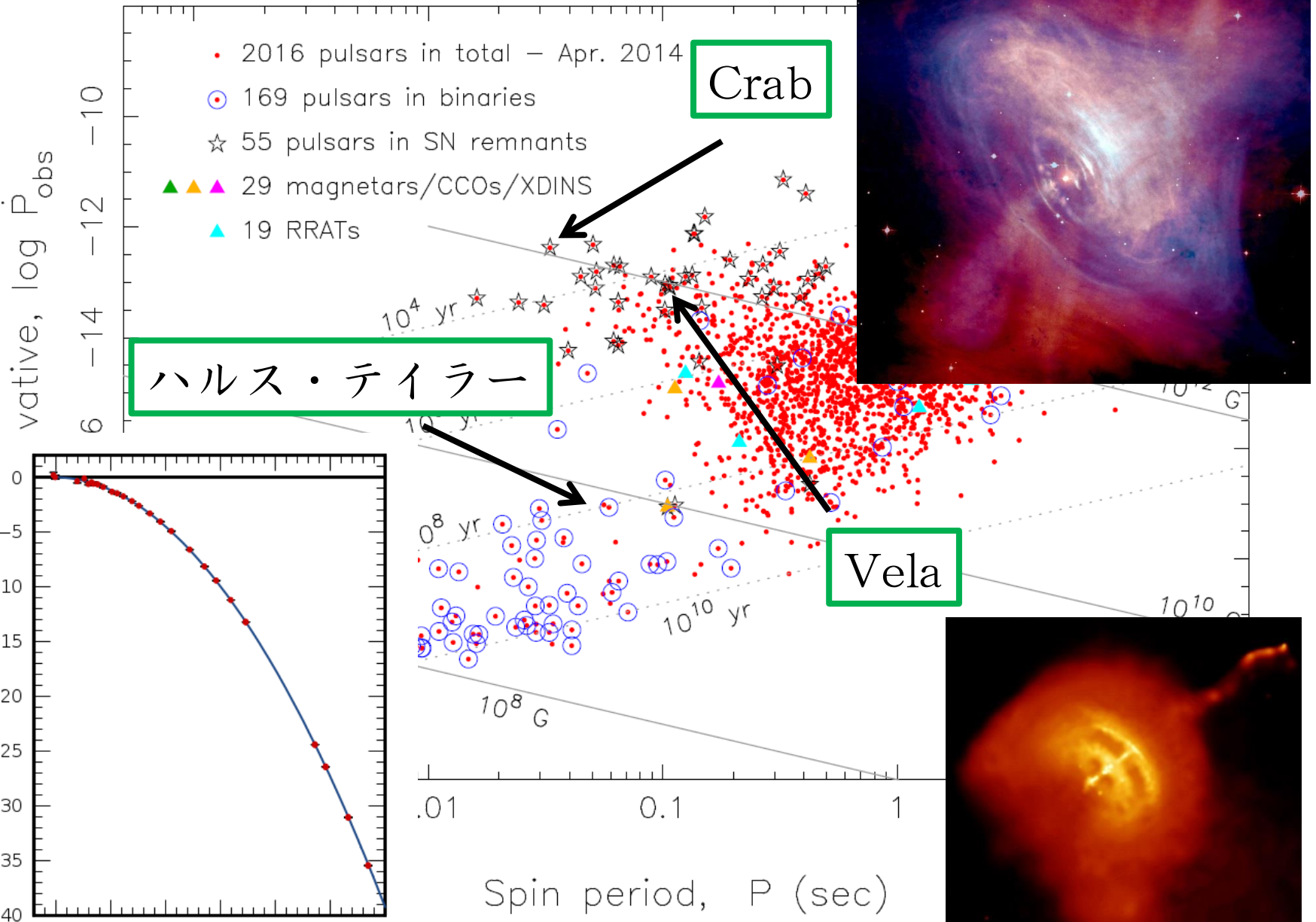
中性子星と共に回転する磁場

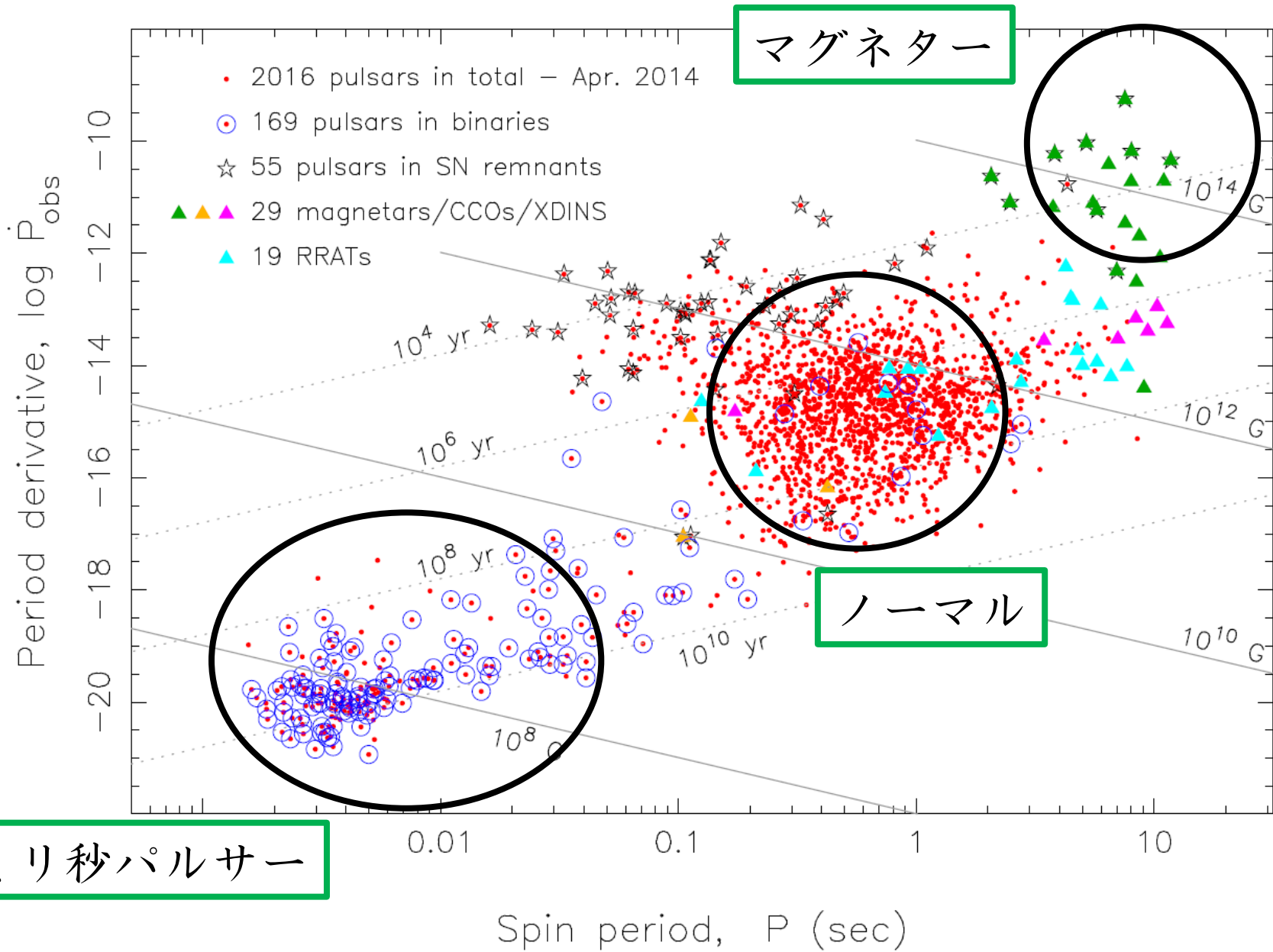
- ・ プラズマが満たす磁気圏
- ・ 電子の加速
→ シンクロトロン放射



handbook of
pulsar astronomy

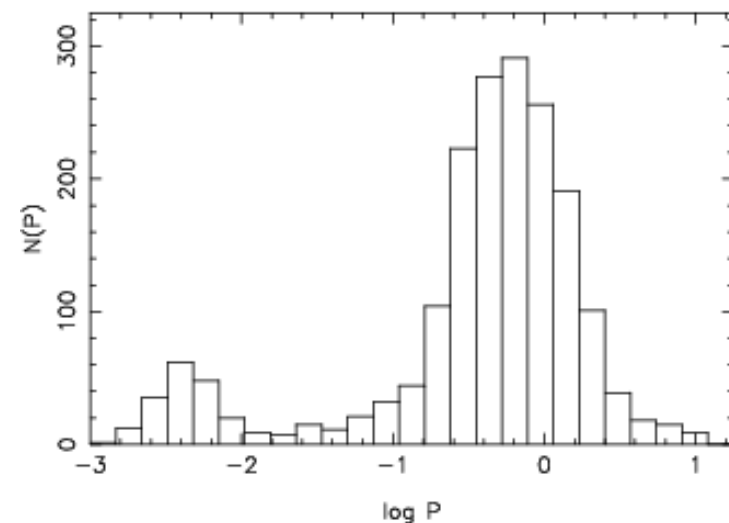
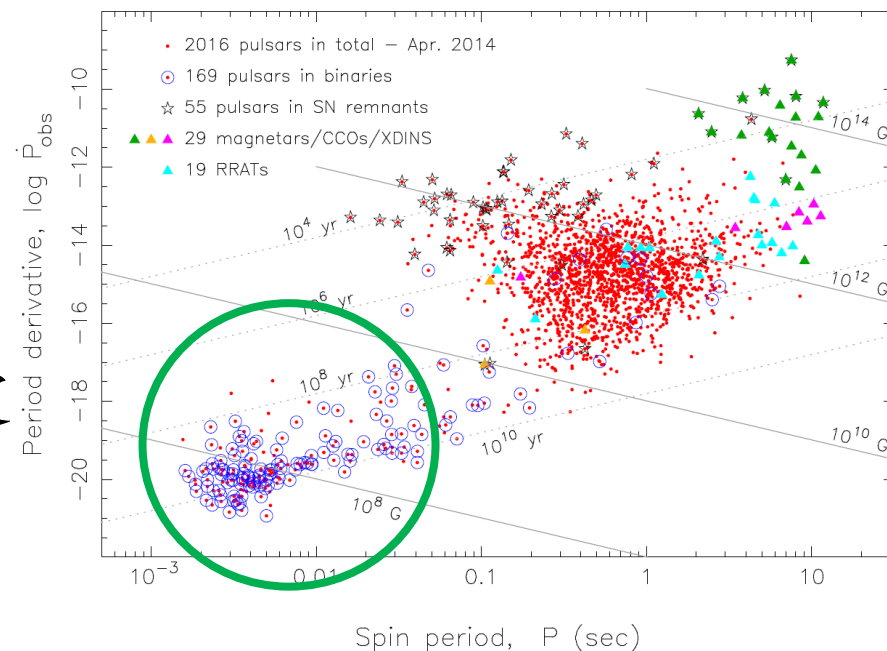






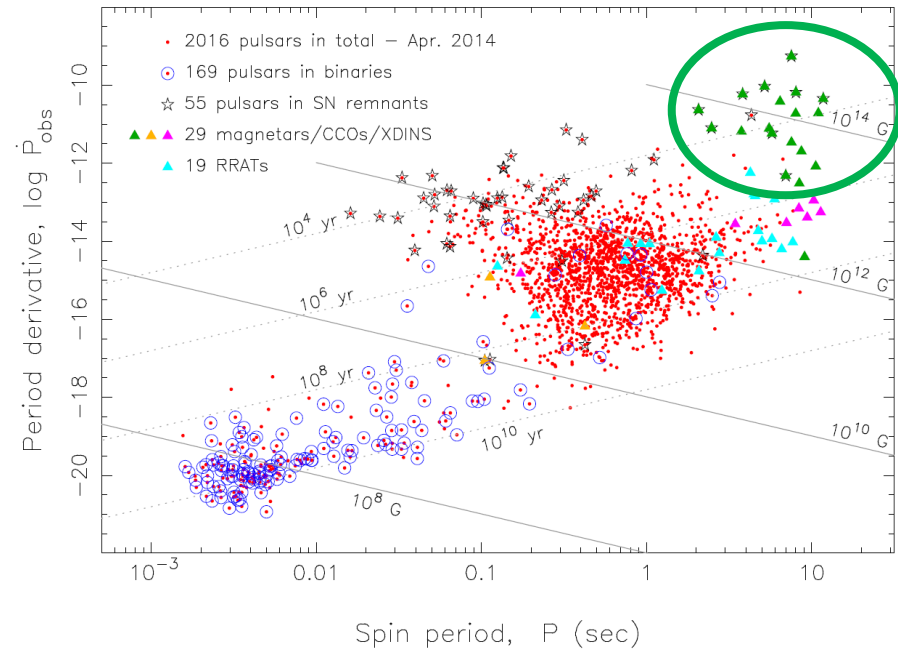
ミリ秒パルサー

- 周期：1-30msec
最小周期：1.3msec
- 現在250個程度
- O(10)個ほどは特に周期が安定
→ 重力波検出、相対論検証
- ほとんどは連星系
- 連星の相手からの降着によってできる (recycling)



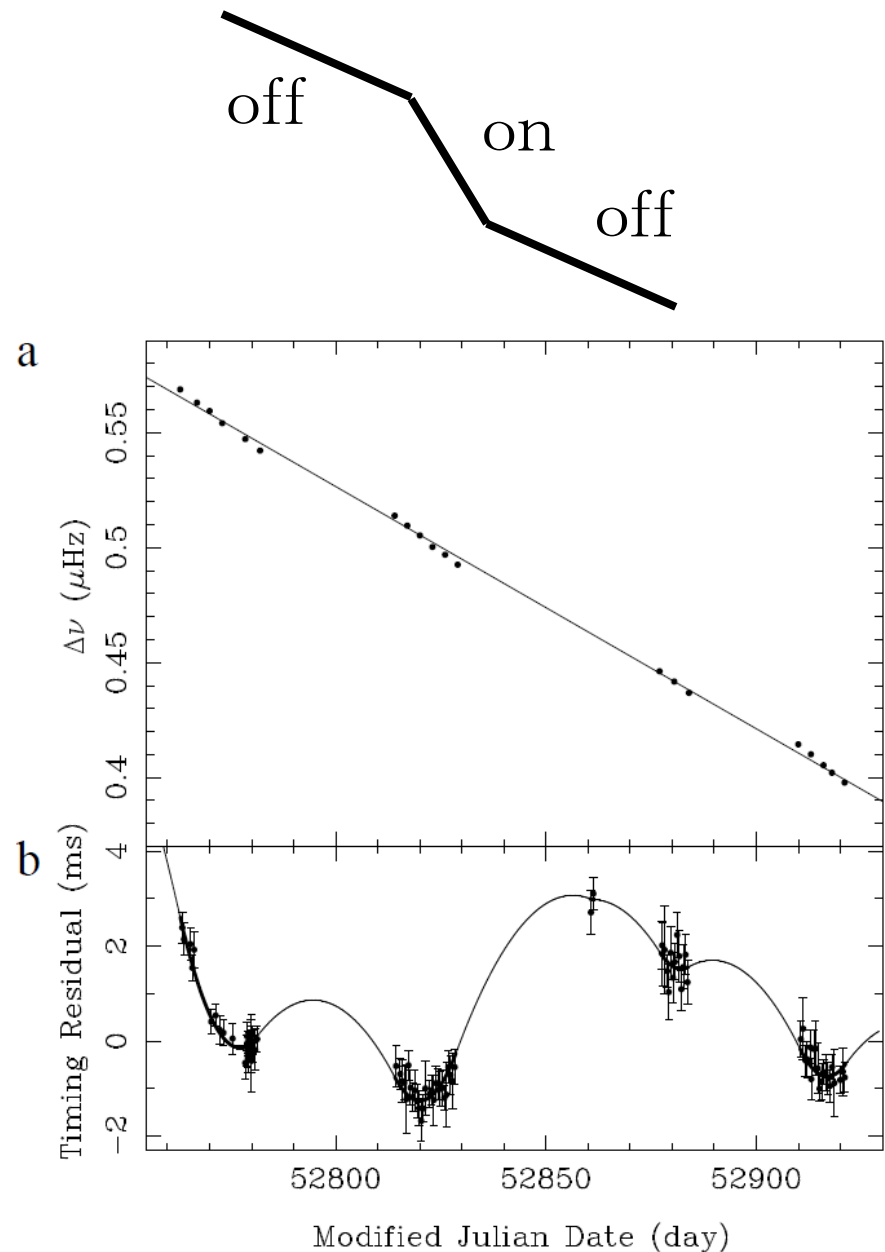
マグネター

- $B > 10^{14} \text{G}$
- 非常に若い
- 26個 (X線・軟ガンマ線)
- 電波で観測できたのは4個
(その内1つは銀河中心)
- 電波パルサーとしても特異
(スペクトル・変動性)
- なんでこんなに強い磁場?
- その後の進化は?
- radio quiet? ビーム角が小さい?
- 普通のパルサーとの関係は?



intermittent pulsar

- 1か月に数日だけ電波放射
cf. nulling, RRAT
- onの時はspin-down rateが大きい
- 電波放射とspin downが関連しているのは不思議
→ 磁気圏を解明するヒント
- off時は本当にoffか？



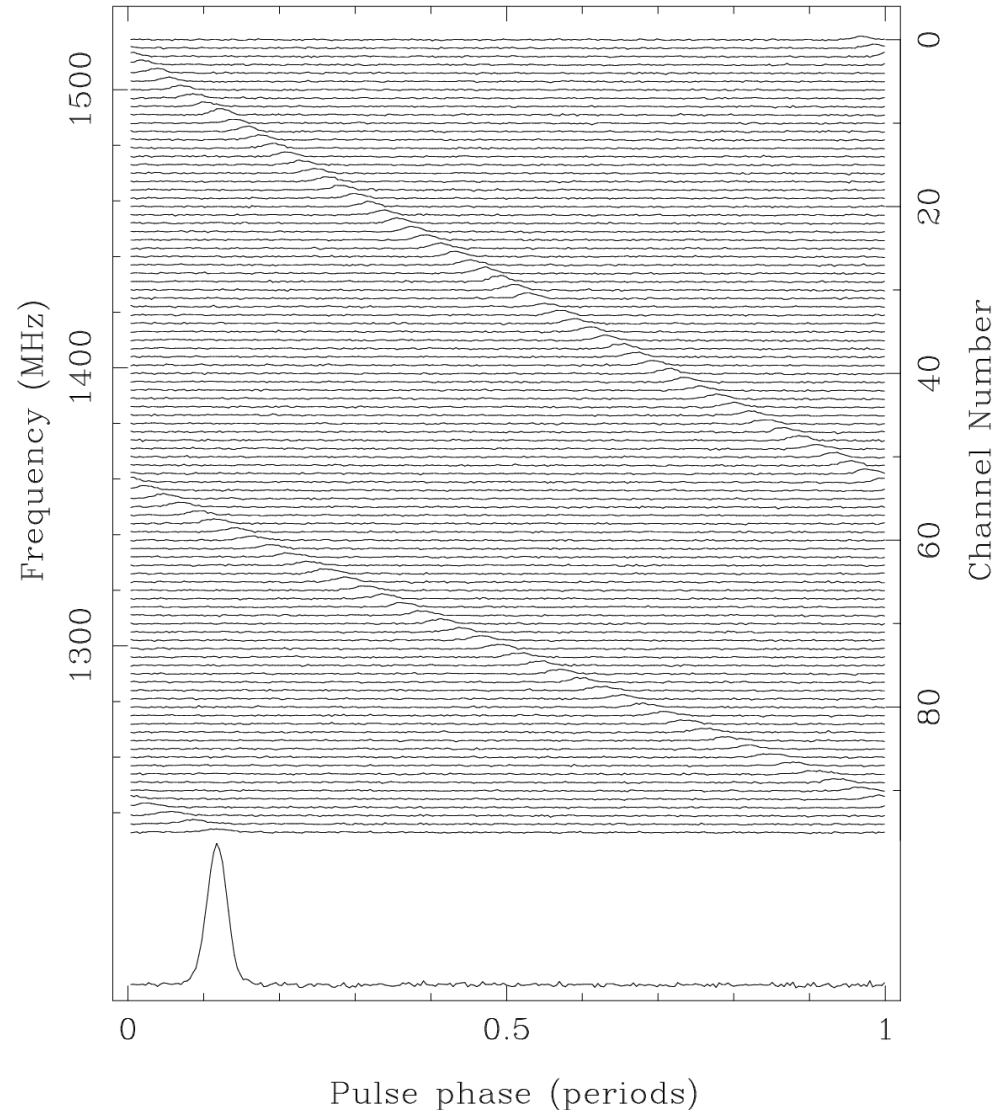
分散遅延

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

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

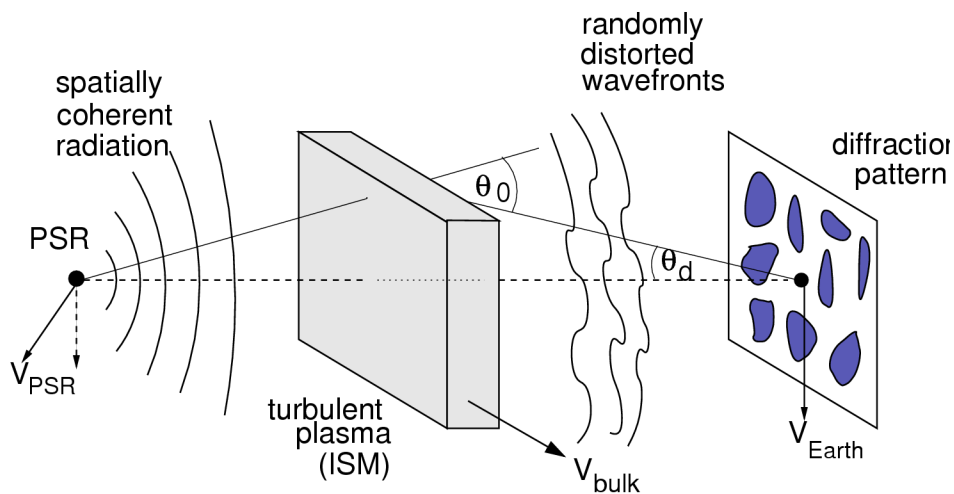
$$DM = \int_0^x n_e dx$$

低周波ほど遅延が大きい

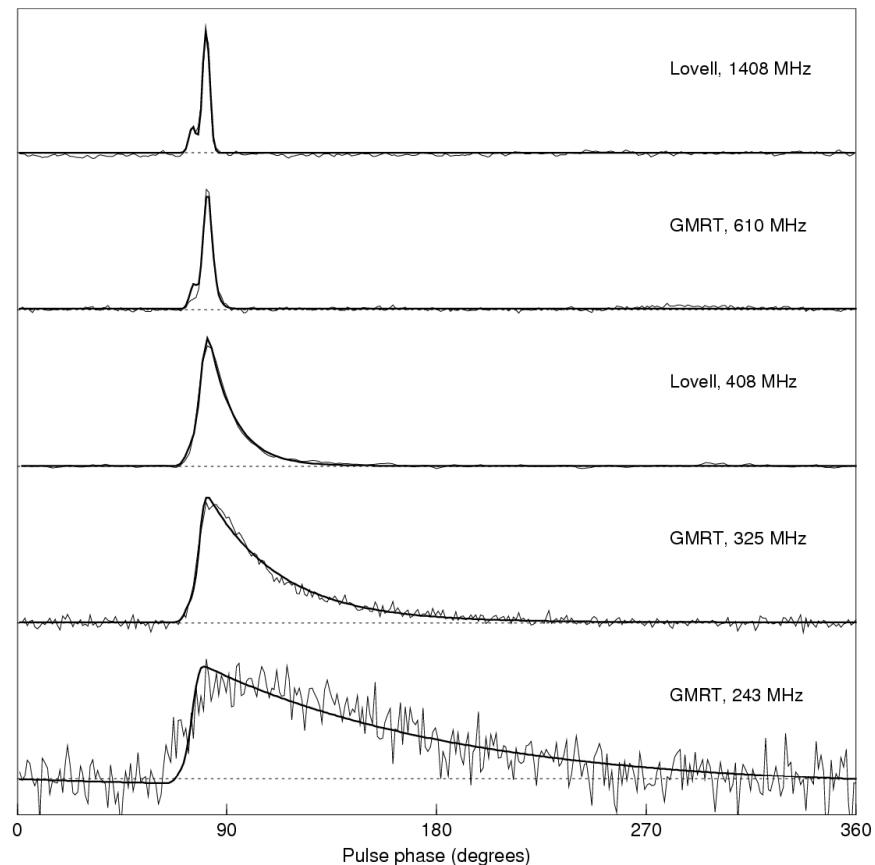


散乱

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

2、SKAによる パルサー観測

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

SKA1-mid全天サーベイ

- ・ 950mコア
- ・ 2年間
- ・ 600sec × 105,120観測
- ・ 36,000deg²
- ・ 50 μ sec sampling
- ・ 800MHz: $|b| > 5\text{deg}$
- ・ 1400MHz: $|b| < 5\text{deg}$
- ・ 周波数分解能 $\sim 20\text{kHz}$

ターゲット観測

- ・ 銀河中心
- ・ 球状星団
- ・ 系外銀河
- ・ タイミング観測
(ミリ秒パルサー)

SKAによるpulsar観測

SKA1サーベイ

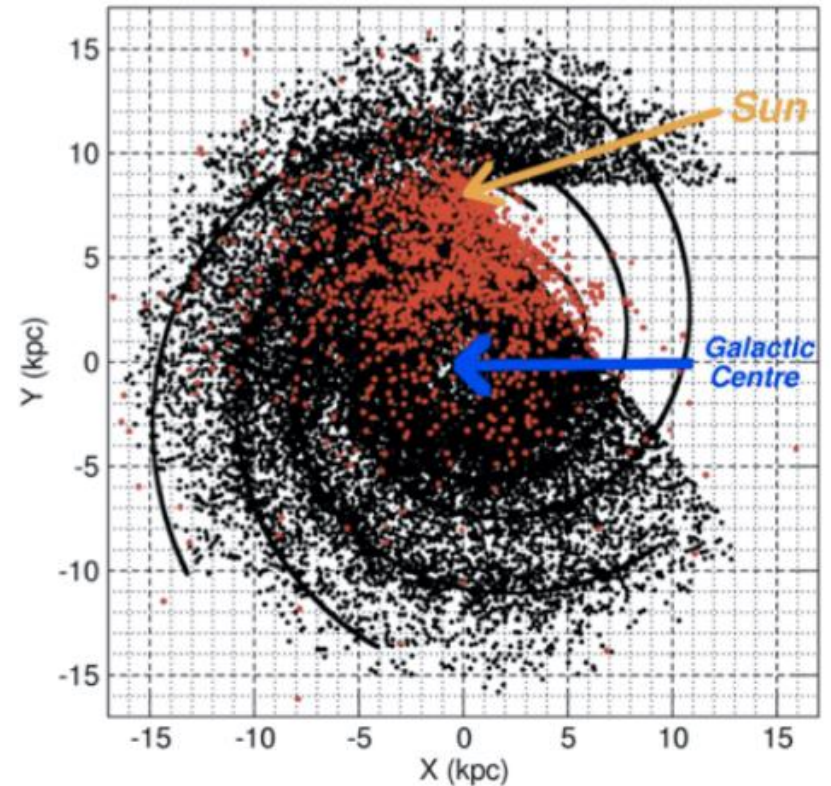
- ・ 9,000 normal pulsars
- ・ 1,400 millisecond pulsars

SKA2サーベイ

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

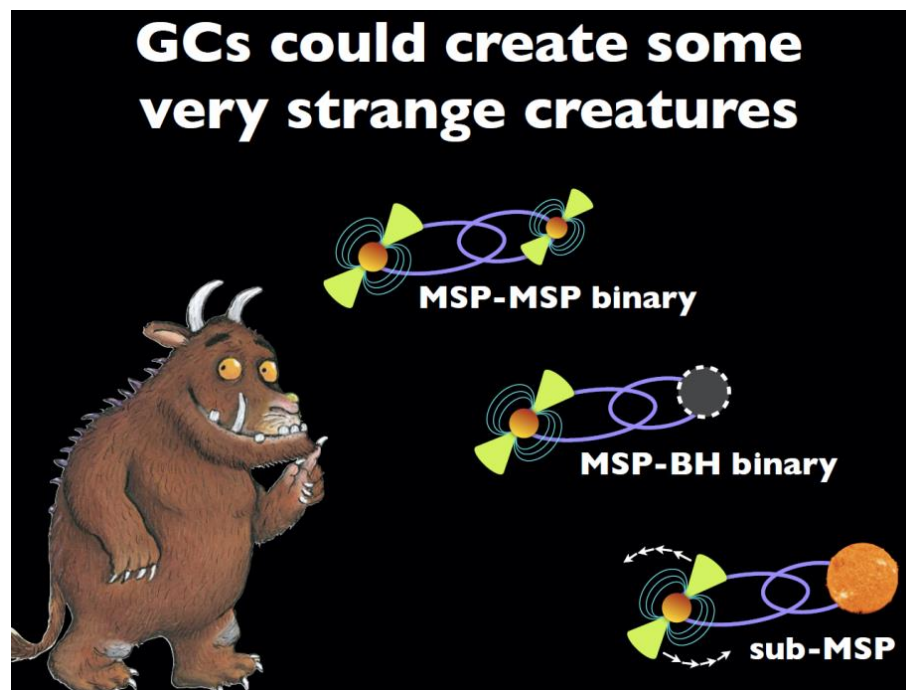
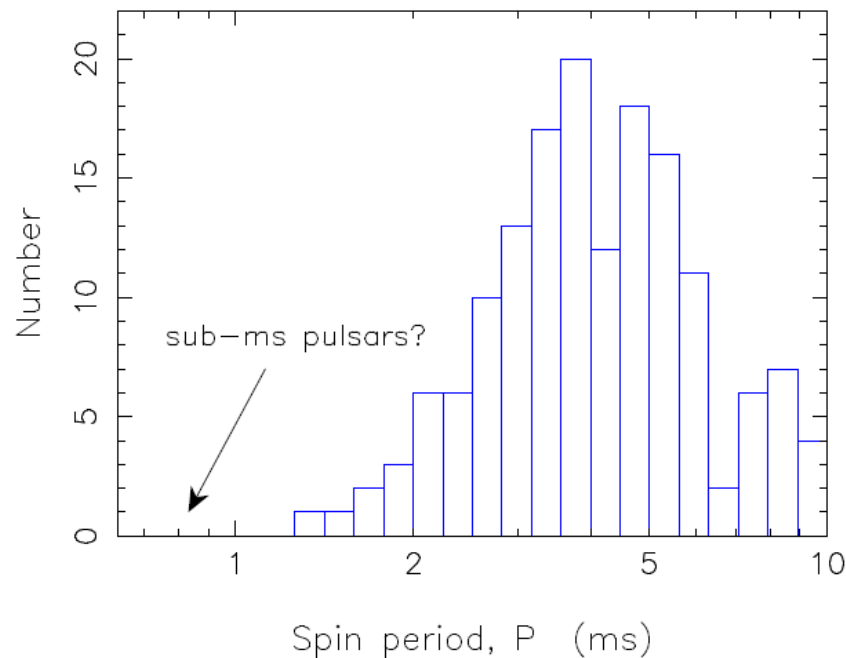
これだけたくさんあると・・・

- ・ 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



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
 - 変なシステムができる
 - 何回も recycling が起こる
 - sub-millisecond?
- 中心に中質量ブラックホール



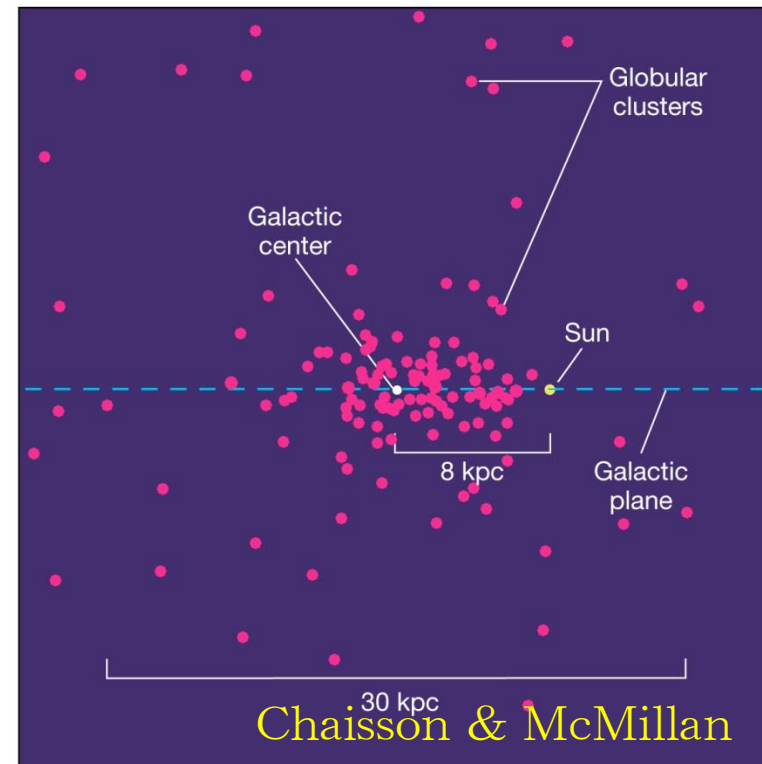
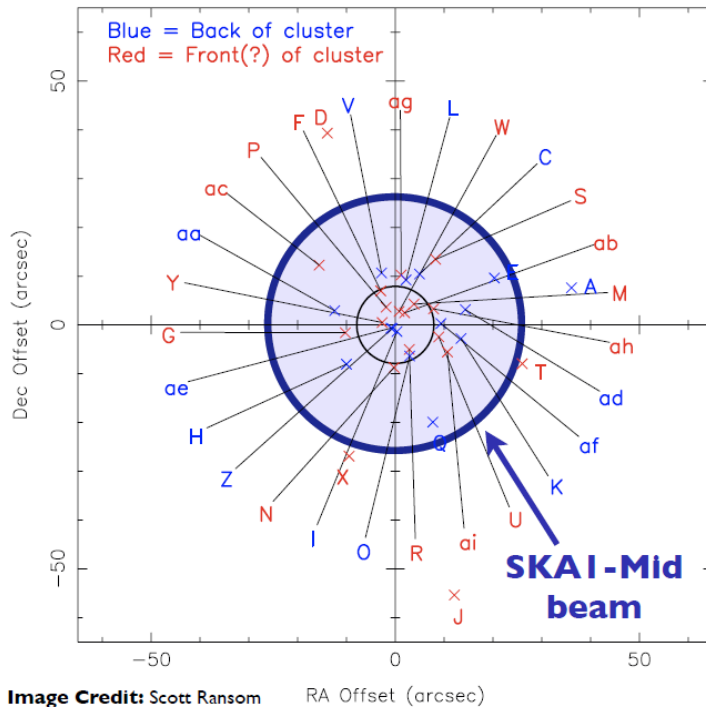
球状星団パルサー

SKA1-mid core tied-array

- 0.9 arcmin (2GHz)
→ 1 pointingで十分!
- バルジ

SKA1-low core tied-array

- 6 arcmin (350MHz)
- 銀河面外



球状星団パルサー

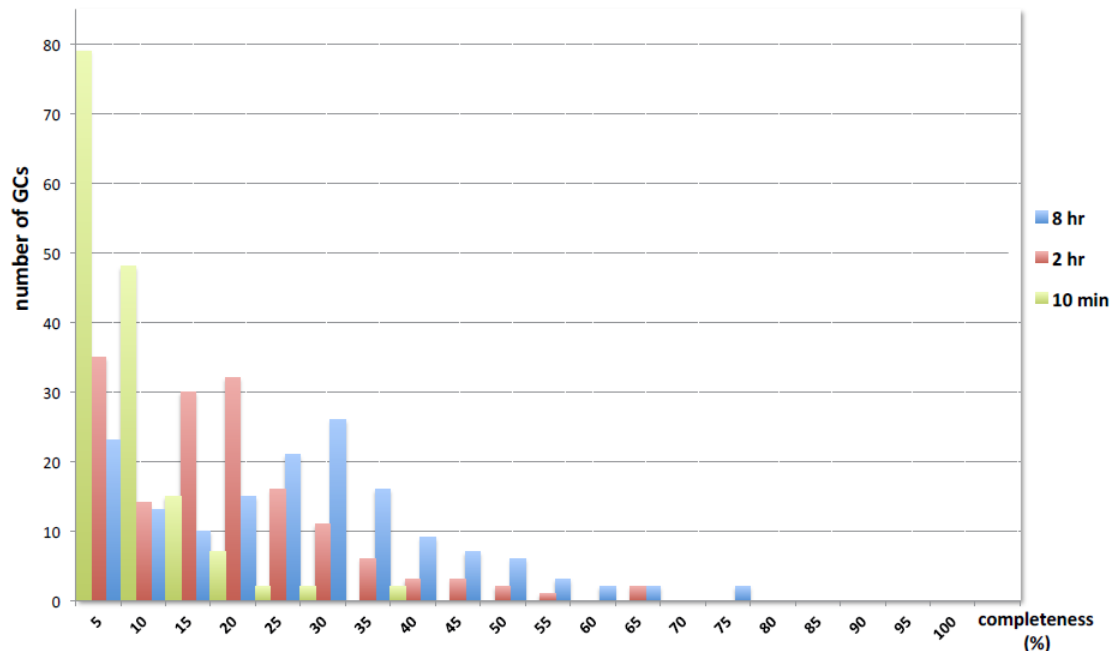
球状星団は狭い範囲を見れば済む！

→ early scienceに最適

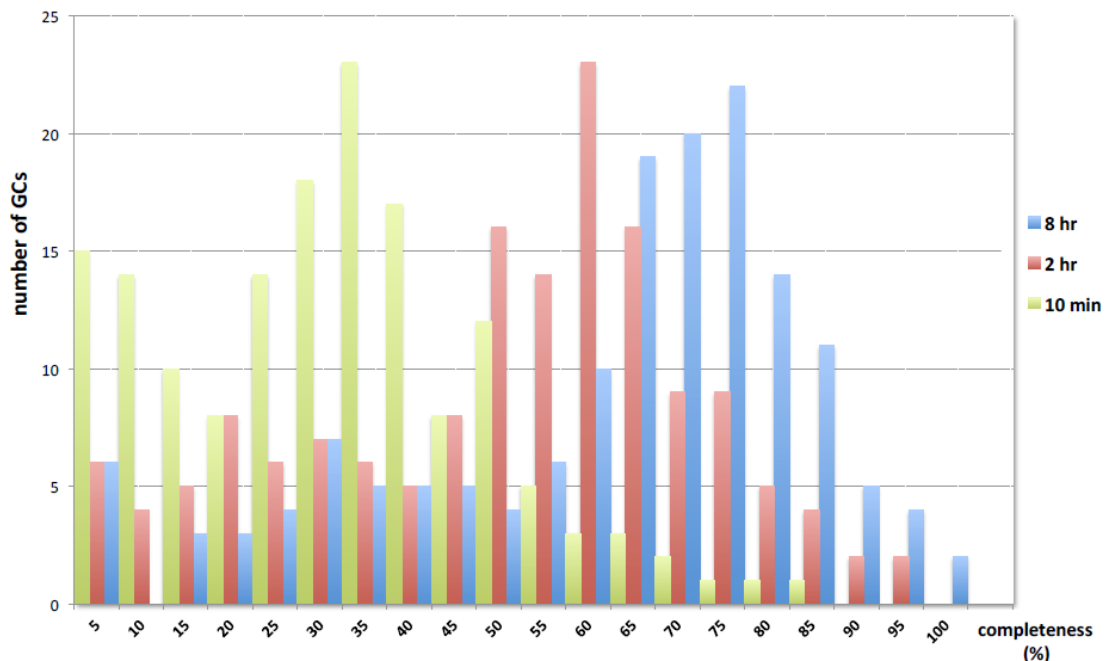
SKA1-mid感度

- $4 \mu\text{Jy}$ with 10min
- $1 \mu\text{Jy}$ with 2hr

SKA1-Mid - GC search completeness



SKA2-Mid - GC search completeness



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

日本のサイエンス

- 背景重力波の異方性検出、個々の源検出
(黒柳、隈本、米丸、高橋)
 - 方法論とソフトウェア開発
 - 物理的示唆
- パルサーペアによる銀河系磁場の探索 (柴田、大野)
- 修正重力理論の探索 (柳、成子、岩田、高橋)
 - 回転ブラックホール解の構築
 - post Kerr formalismの構築
- Giant Radio Pulse (寺澤、三上)
 - パルサー放射機構
 - パルサー周辺のプラズマ微小構造探査

3、重力波直接檢出

pulsar timing array

重力波が通過

→ 時空の変化でパルスの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

(2週間)⁻¹ ~ (数年)⁻¹

→ 1 μ Hz ~ 1 nHz

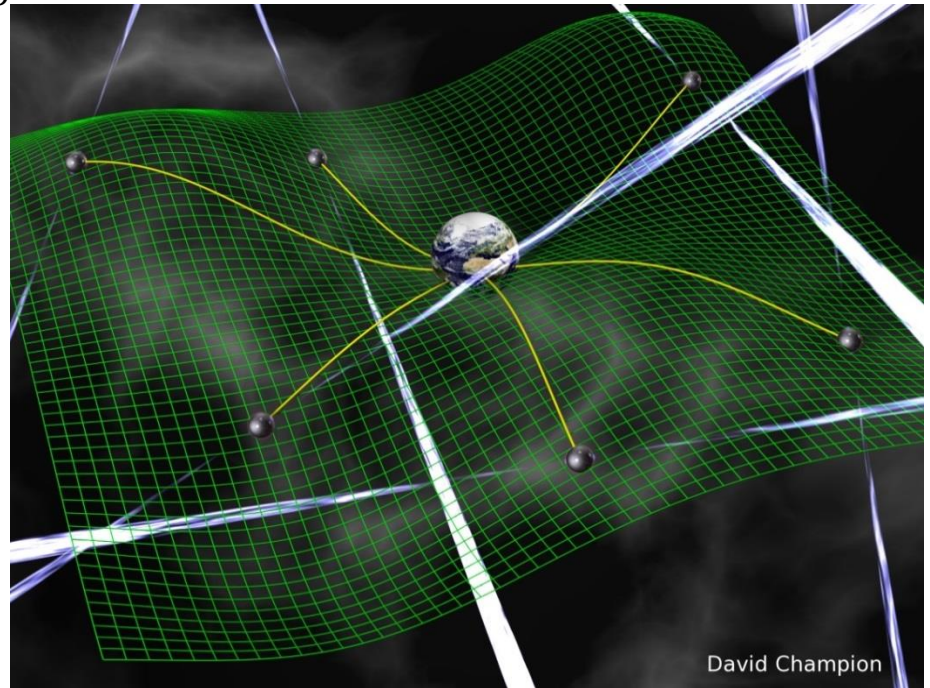
→ 巨大ブラックホールバイナリー、宇宙ひも

感度：10 ns/ 1 yr ~ 3×10^{-15}

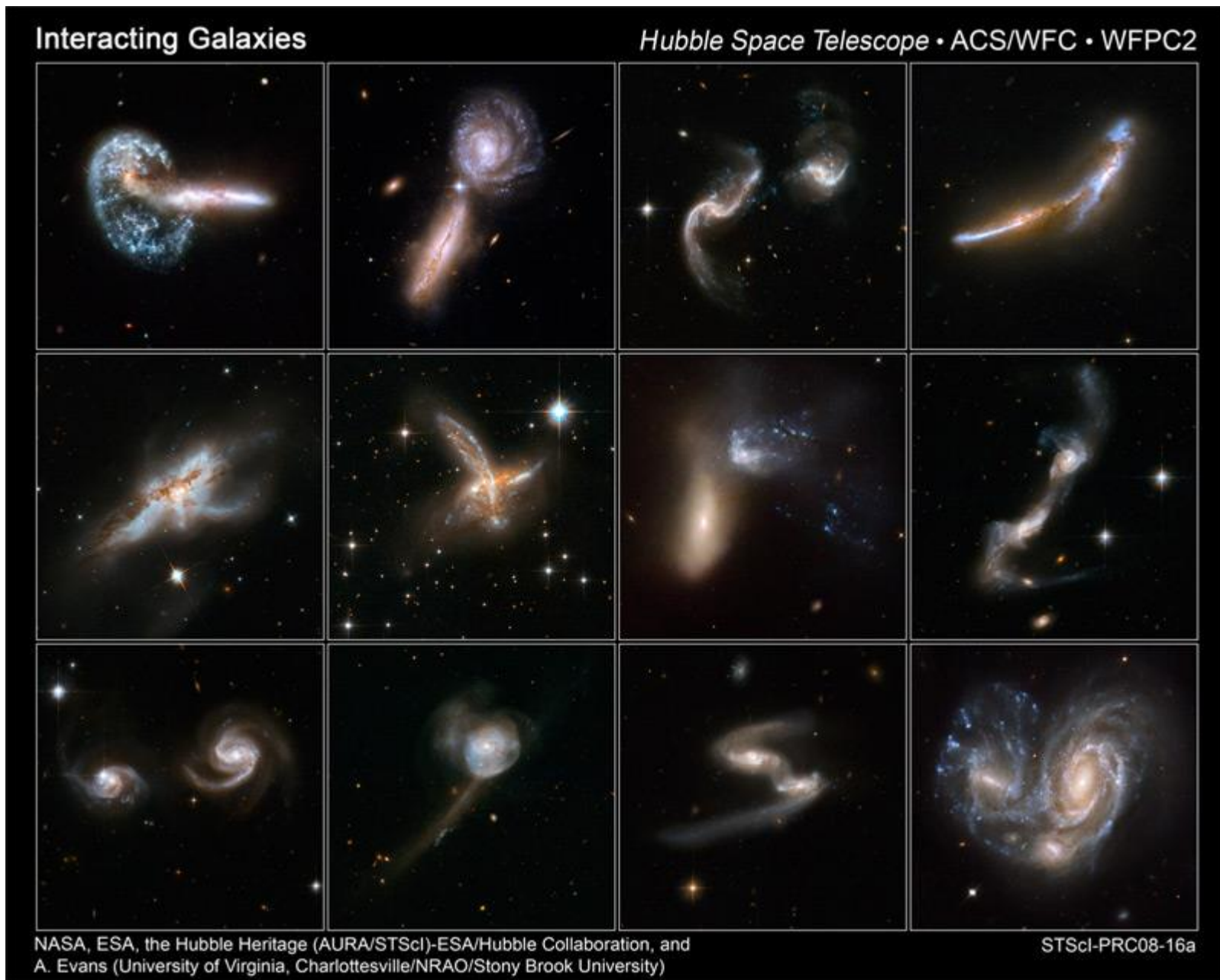
とりあえずは

「等方な背景重力波」

を観測する。

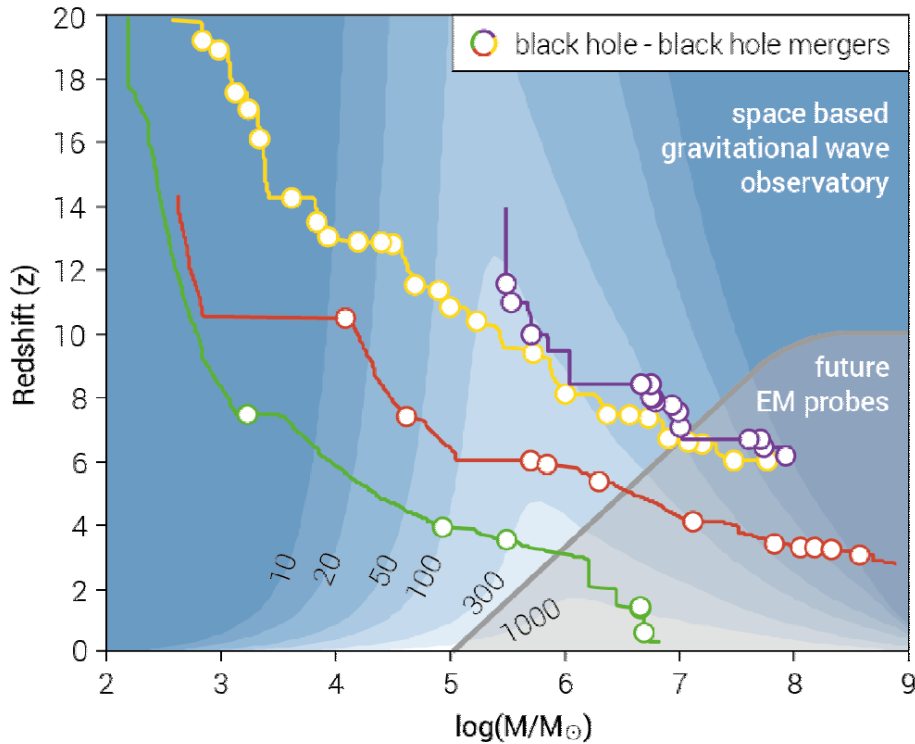


銀河衝突

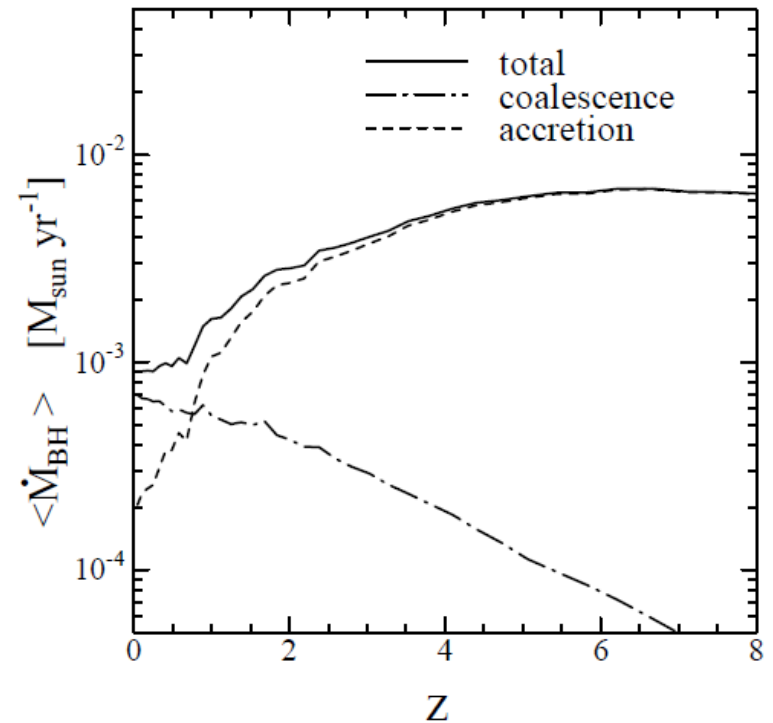


巨大ブラックホールの合体

銀河が衝突すると、それぞれの中心にある巨大BHの連星ができ、やがて合体する。



Sesana 2013



Enoki et al. 2004

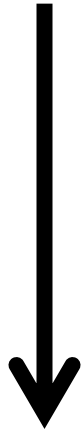
final-parsec problem

- 銀河衝突後バイナリー形成
- dynamical friction (星を跳ね飛ばす)
→ 軌道半径 ~ 10 pc

- 重力波によってハッブル時間内にエネルギーを抜く
→ 軌道半径 ~ 0.1 pc
- 合体

final-parsec problem

- ・ 銀河衝突後バイナリー形成
- ・ dynamical friction (星を跳ね飛ばす) で軌道を縮める
→ 軌道半径 ~ 10 pc



どうやって軌道を縮ませるか？

final-parsec problem

- ・ 星やガスがどんどん供給される？
- ・ circum-binary disc？

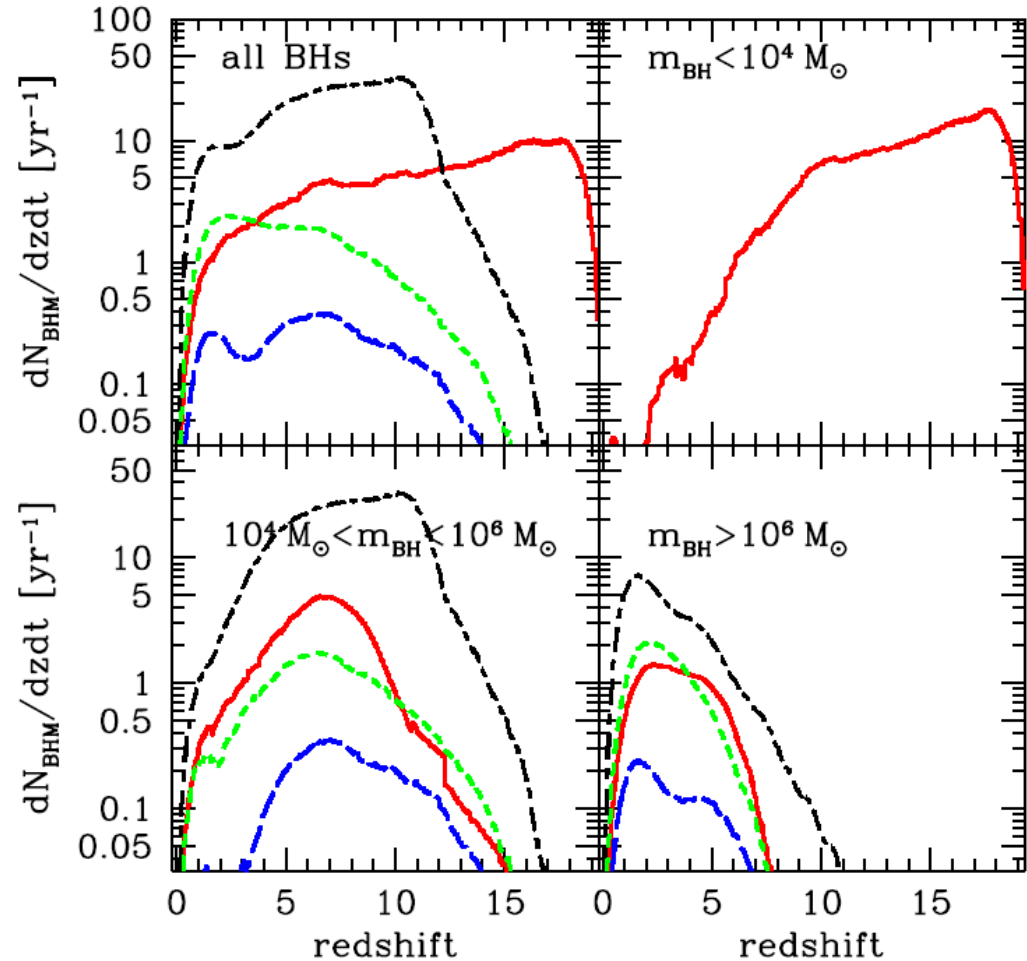
- ・ 重力波によってハッブル時間内にエネルギーを抜く
→ 軌道半径 ~ 0.1 pc
- ・ 合体

BH merger history

BH合体史

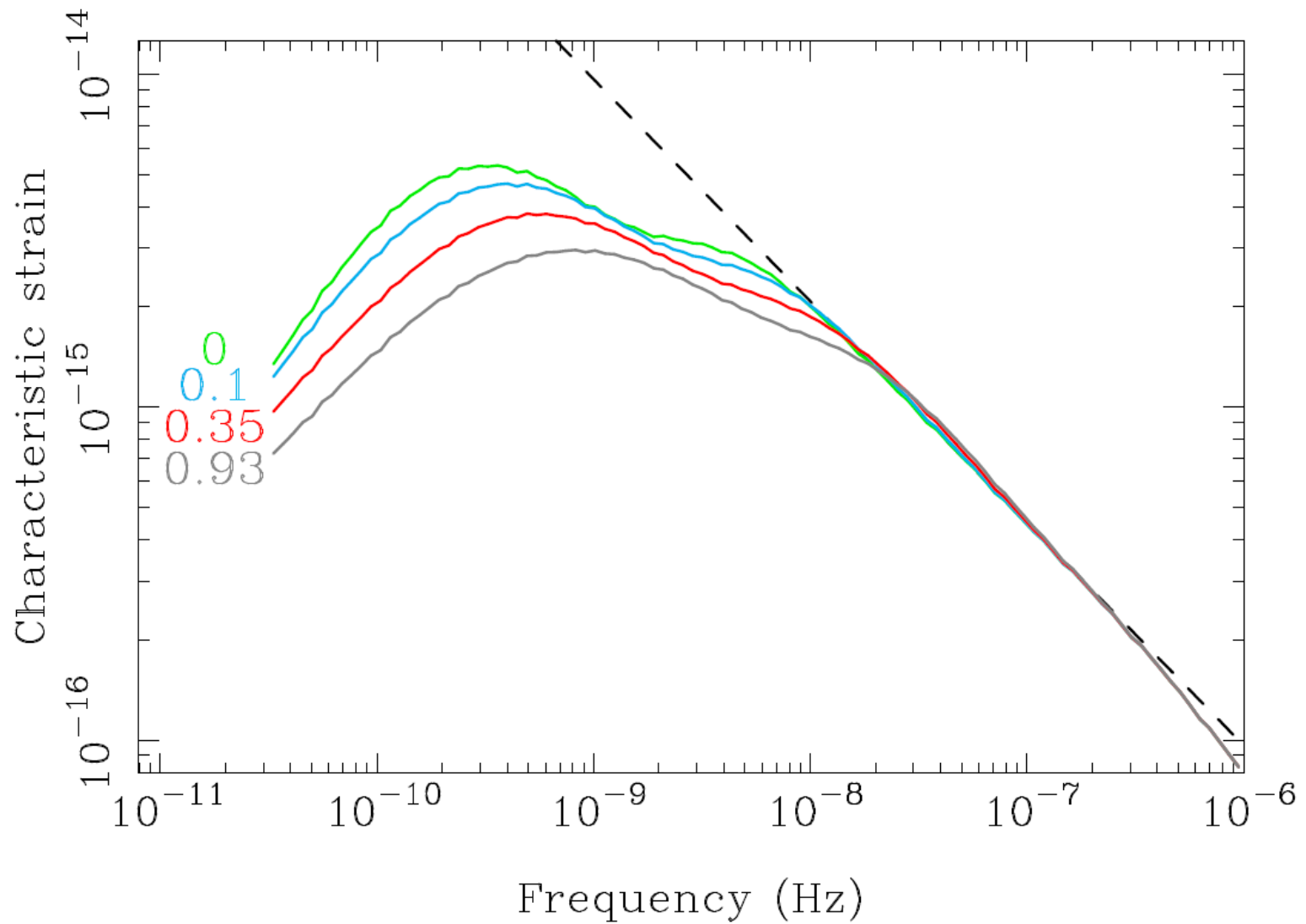
- 銀河衝突史
- 銀河衝突から重力波放出までの時間
- 銀河質量 - BH質量関係

これらが背景重力波
見積もりの不定性になる



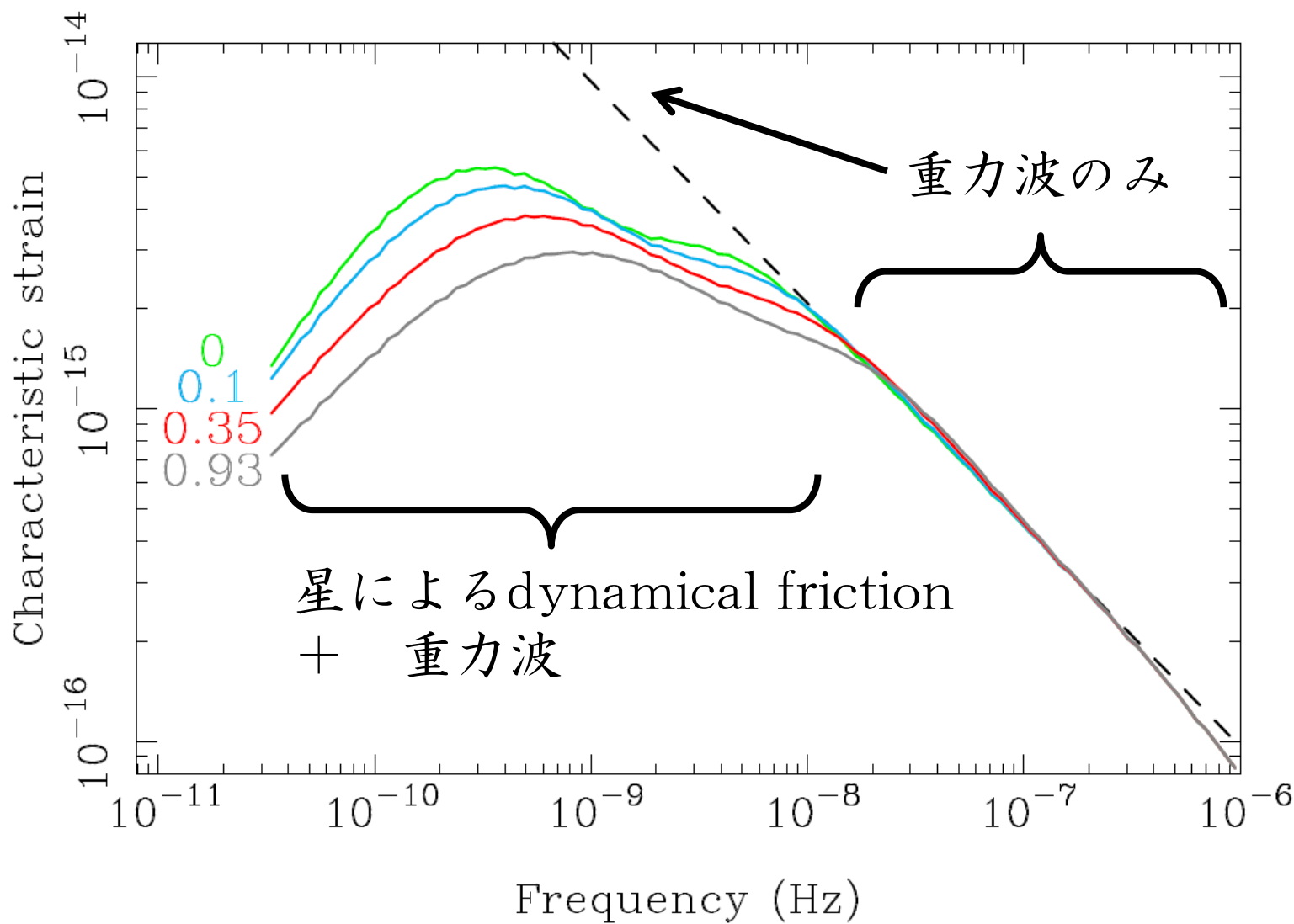
背景重力波スペクトル

Ravi et al. 2014



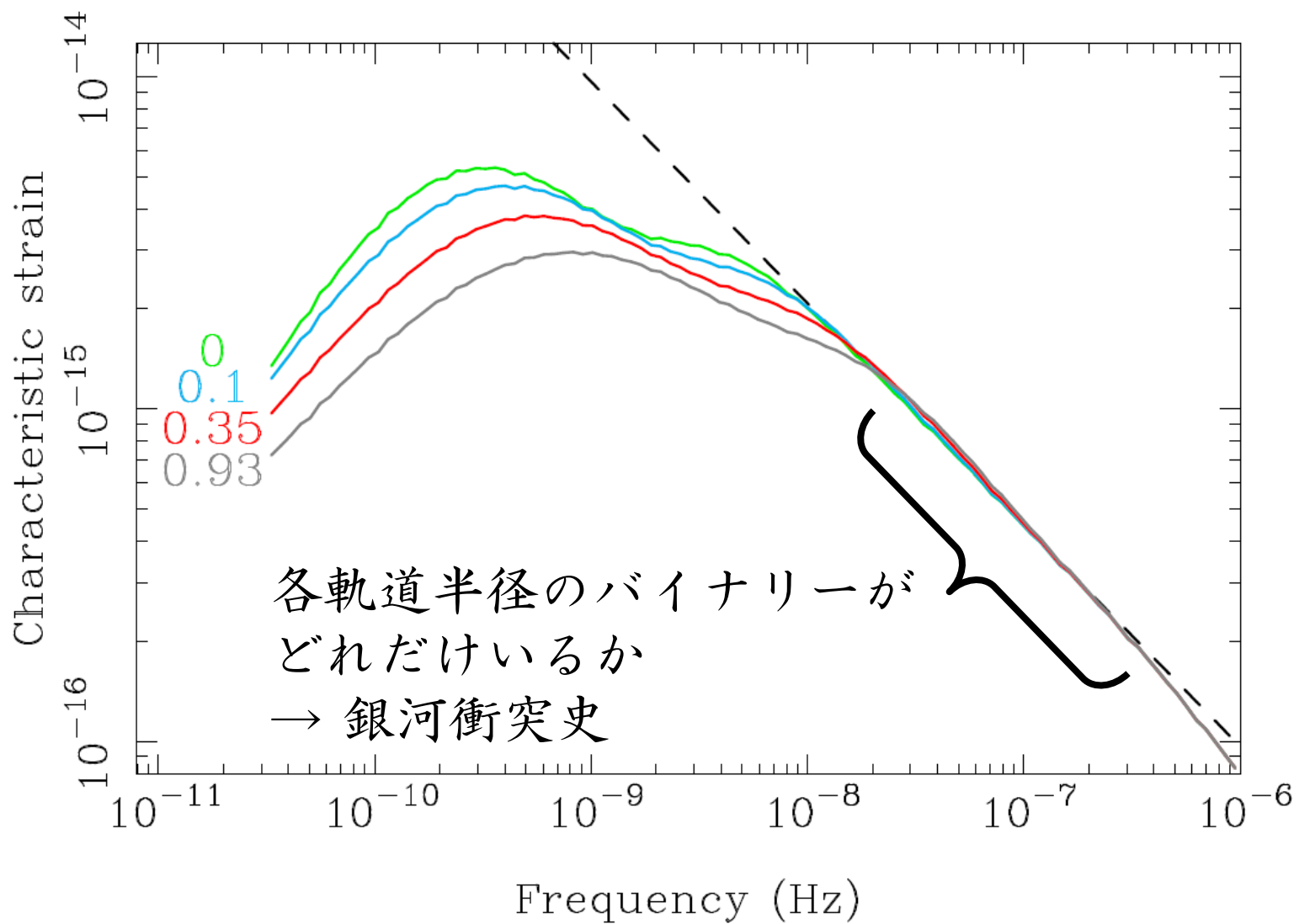
背景重力波スペクトル

Ravi et al. 2014



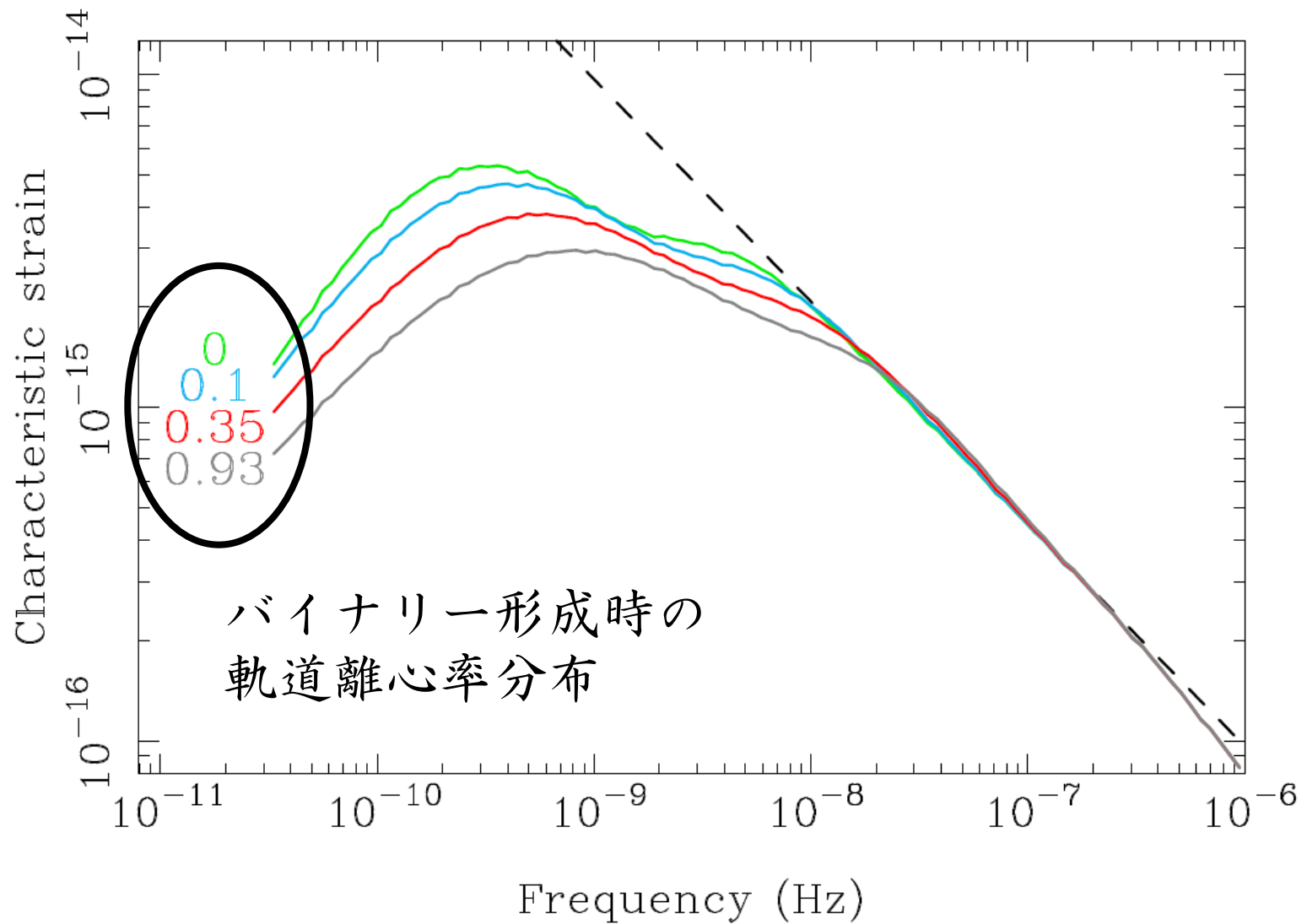
背景重力波スペクトル

Ravi et al. 2014



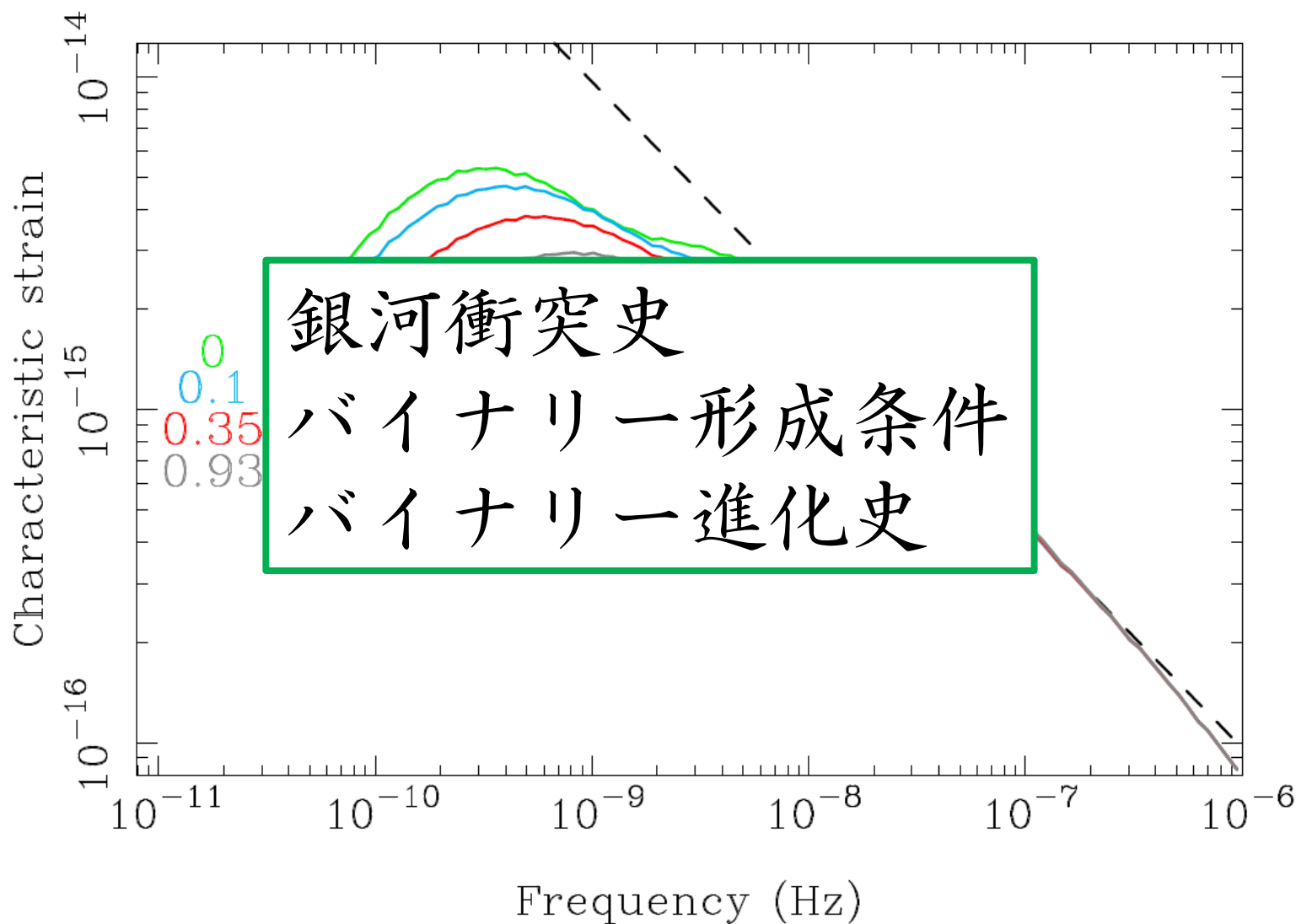
背景重力波スペクトル

Ravi et al. 2014



背景重力波スペクトル

Ravi et al. 2014



pulsar timing array

タイミング観測戦略

- ・ 性質の良いミリ秒パルサーの選別

- 明るい
- パルス幅が狭い
- 周期が安定している

→ 5-10%程度だけが重力波観測に使える (～100個)

pulsar timing array

タイミング観測戦略

- ・ 性質の良いミリ秒パルサーの選別
 - 明るい
 - パルス幅が狭い
 - 周期が安定している
- 5-10%程度だけが重力波観測に使える (～100個)
- ・ SKA1-midタイミング観測パラメータ
 - 基線長：200km
 - 1か月に48時間の観測
 - 必要なS/N > 1000
 - 観測時間：3分 (Band2)、12分 (Band3)
 - timing resolution：100nsec

pulsar timing array

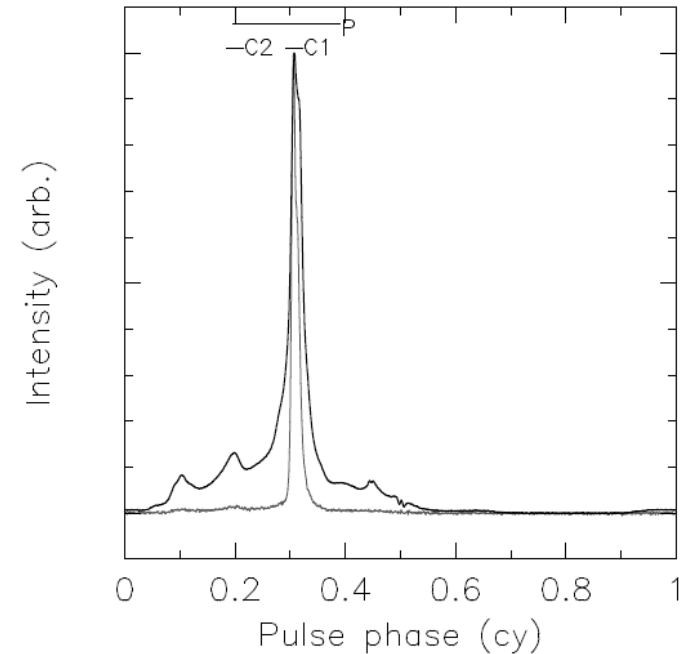
タイミング観測戦略

- 性質の良いミリ秒パルサーの選別
 - 明るい
 - パルス幅が狭い
 - 周期が安定している
- 5-10%程度だけが重力波観測に使える (~100個)
- SKA1-midタイミング観測パラメータ
 - 基線長：200km
 - 1か月に48時間の観測
 - 必要なS/N > 1000
 - 観測時間：3分 (Band2)、12分 (Band3)
 - timing resolution：100nsec
- timing modelより Time of Arrival (ToA) residualを求める
 - パルサーの運動、年周視差
 - スピンダウン

ノイズ

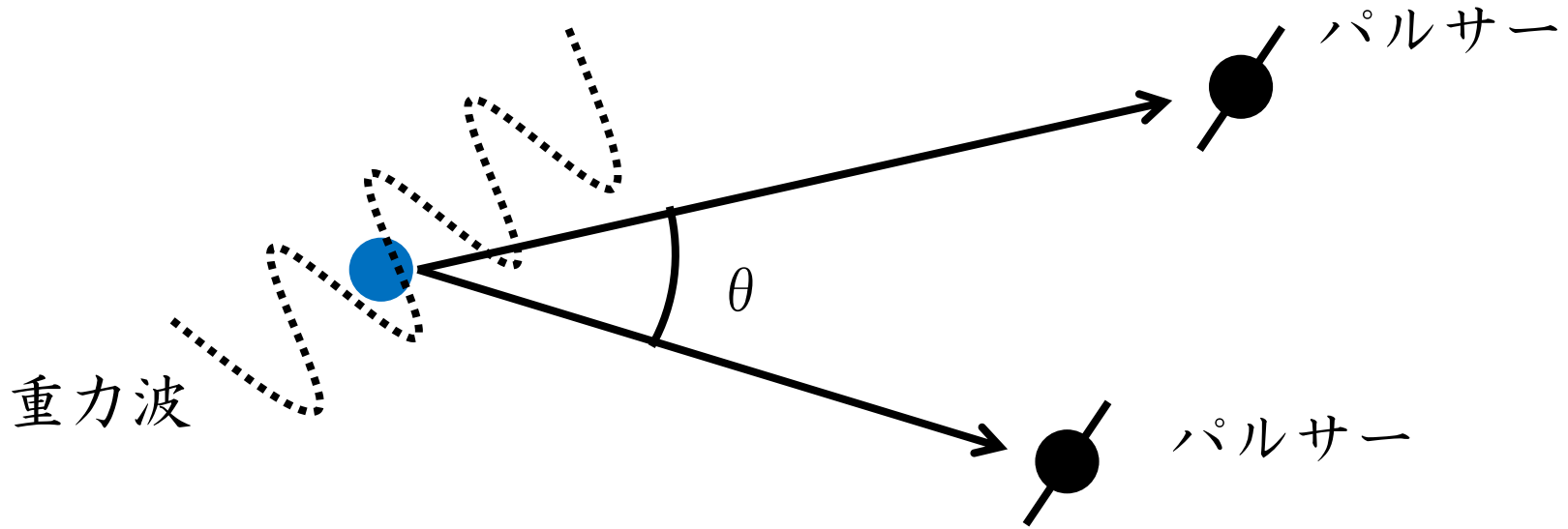
重力波以外のパルス到着時刻をずらす効果

- jitter noise :
パルスの形状の時間変化により
パルス到着時刻決定に誤差
→ 除去は難しい
- timing noise :
パルス周期のintrinsicなゆらぎ
→ 除去は難しい
- ISMの時間変化
 - パルサーの運動は速い
 - 分散遅延
 - 散乱→ 周波数依存性でできるだけ補正

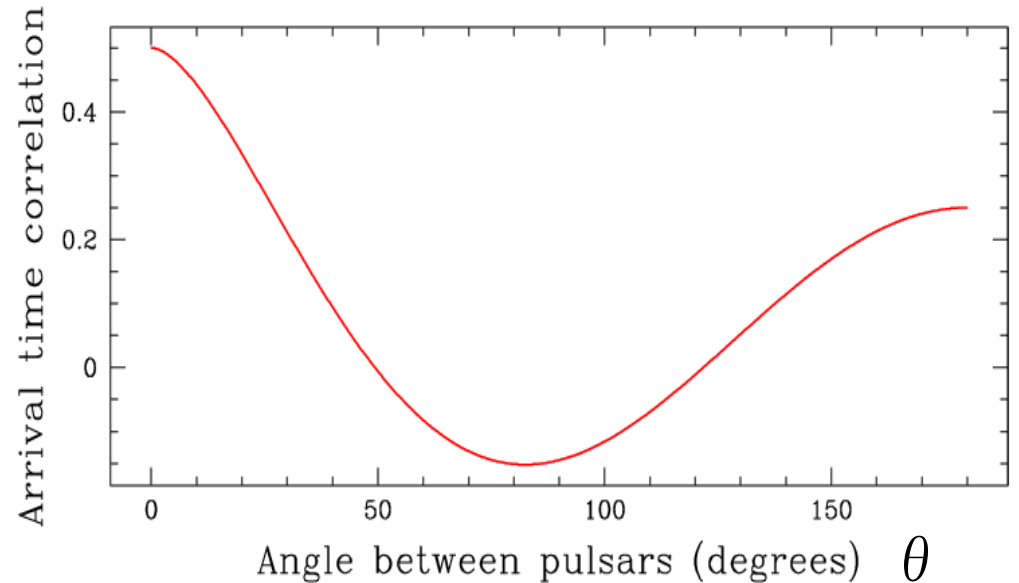


ノイズをどう避けるか？

Hellings & Downs curve



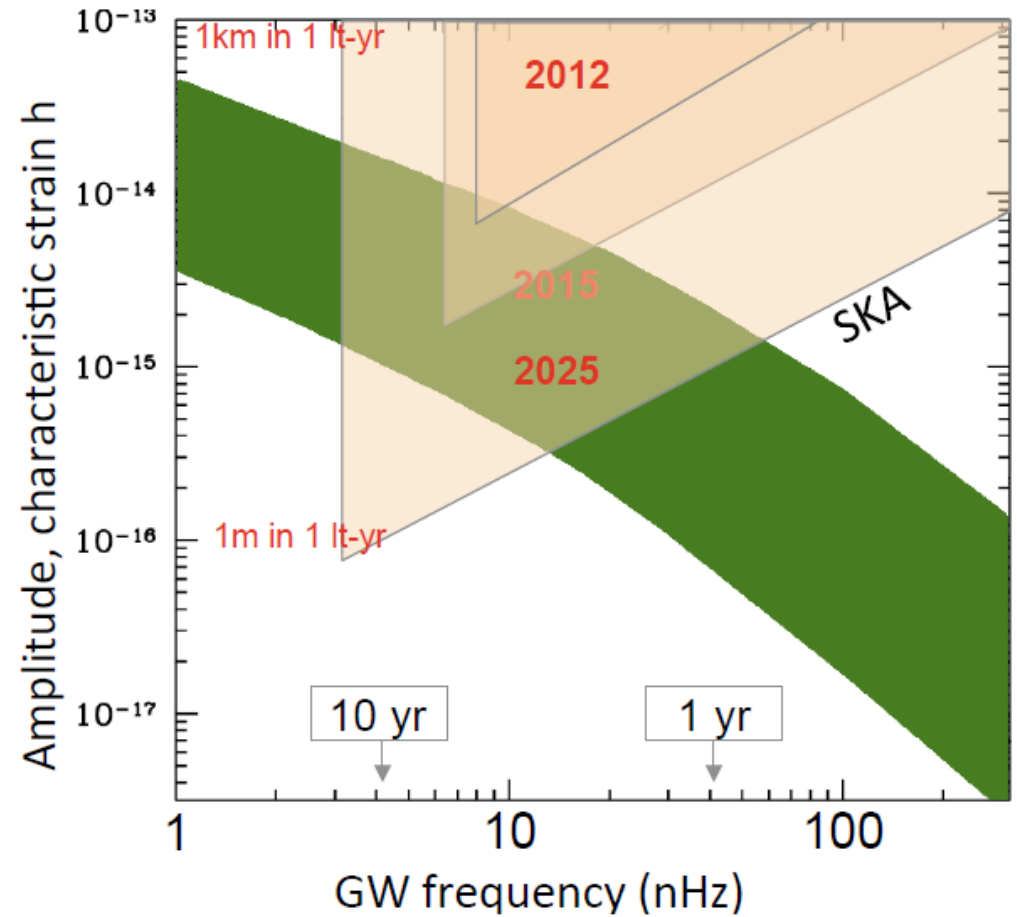
- 2つのパルサーの到着時刻残差の相関を見る
→ 他のノイズを除去
- できるだけ多く
 - 天球面上で一様に



感度予想

- 実はすでに感度は予測値の上限に近い
- SKA以前に検出される可能性はある
- SKA1なら確実

Kramer スライド

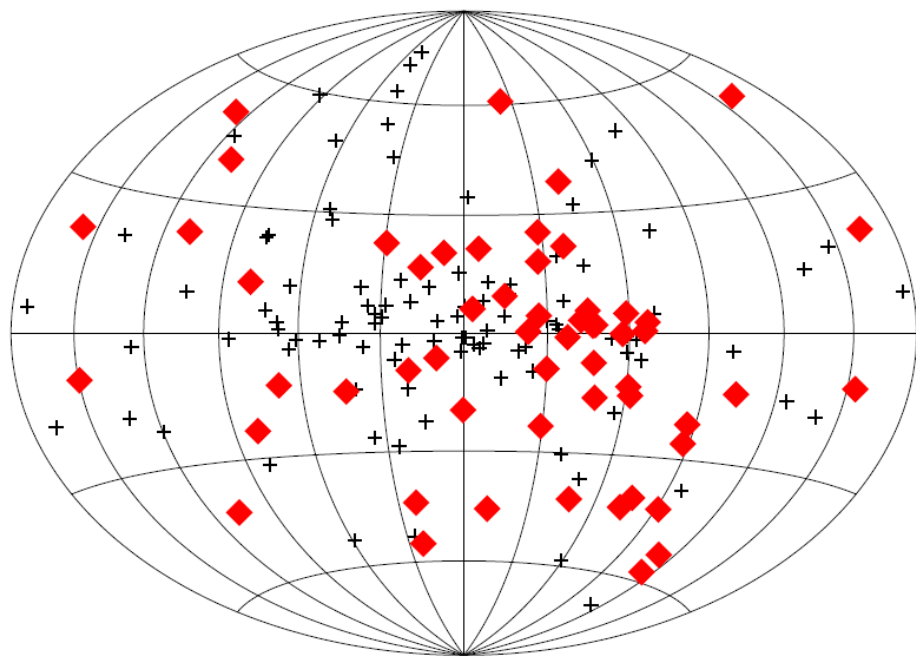


現在のPTA

3つグループ

- PPTA
- EPTA
- NANOGrav

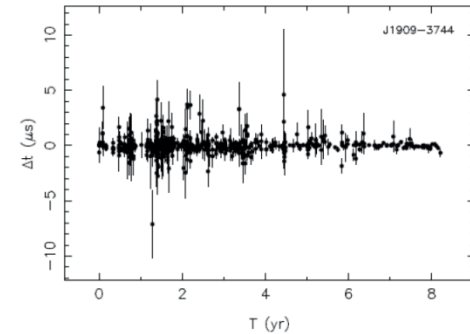
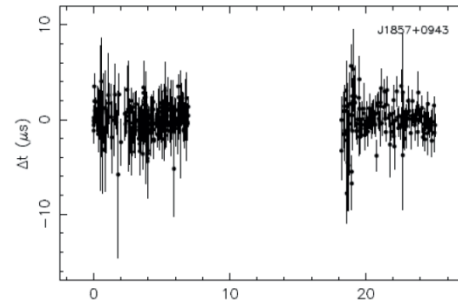
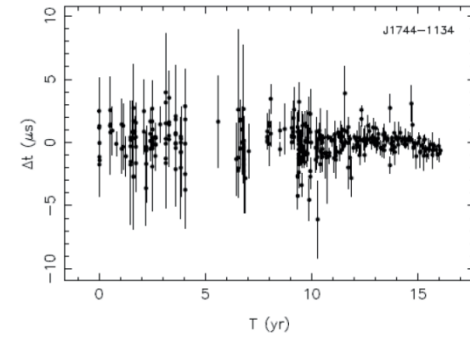
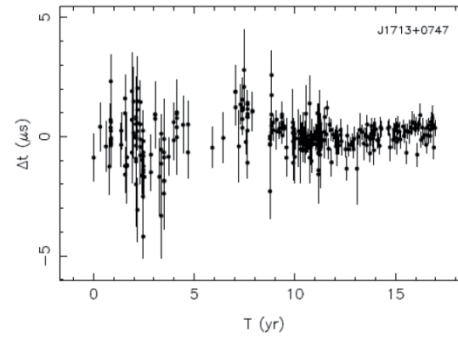
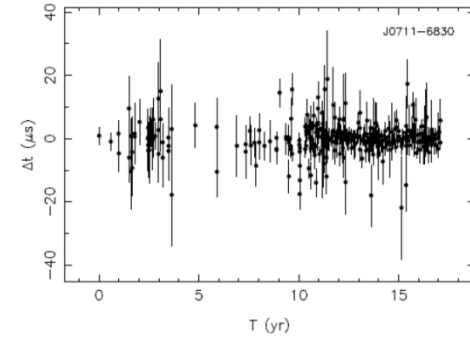
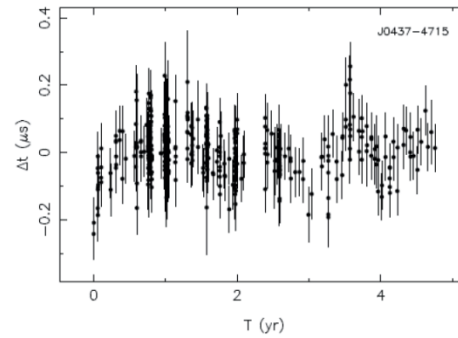
コンソーシアム → IPTA



Shannon et al. 2013

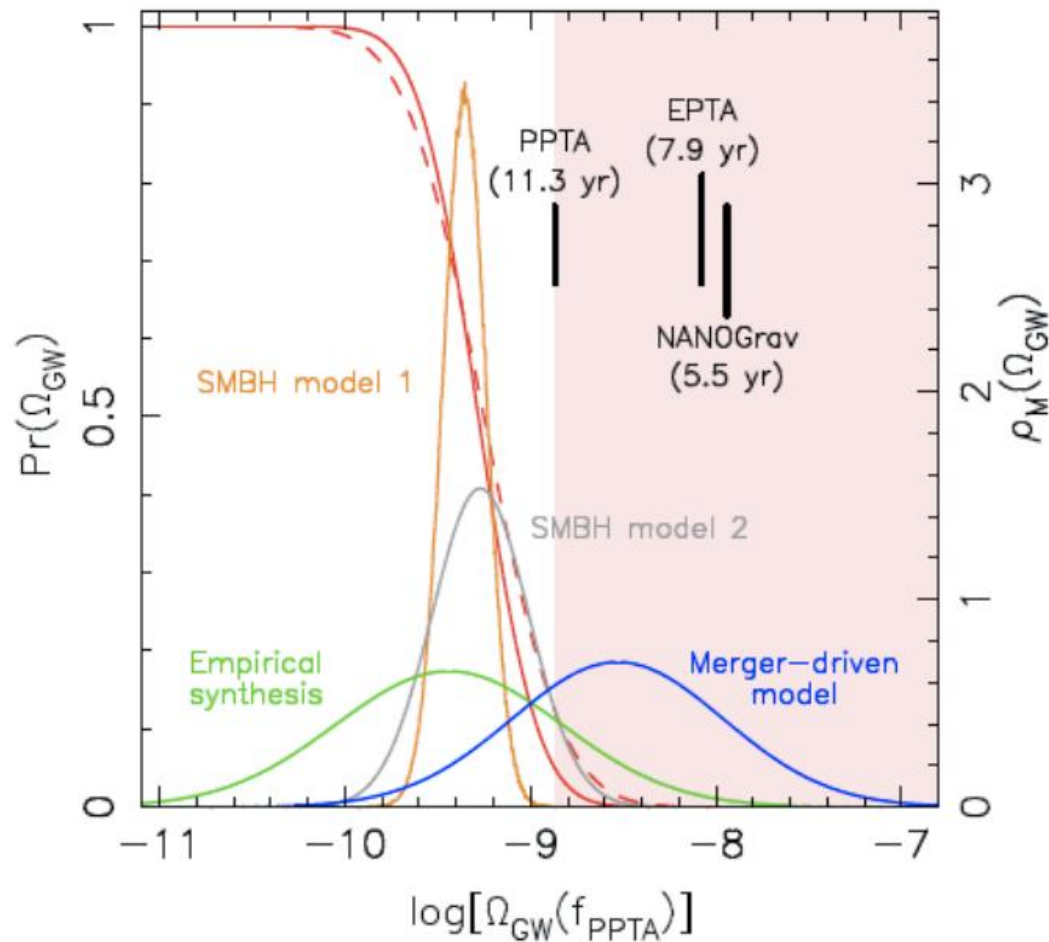


6つのパルサーの
5～25年に渡る観測を
用いて現在最も厳しい上限を
与える。



PSR	EQUAD (μs)	σ_{ToA} (μs)	T_{span} (yr)	λ_{best} (cm)
J0437-4715	0.065	0.066	4.8	10
J0711-6830	1.5	2.6	17.1	20
J1713+0747	0.25	0.51	17.0	10
J1744-1134	0.50	0.73	16.1	20
J1857+0943	0.65	1.16	25.1	20
J1909-3744	0.17	0.24	8.2	10

Shannon et al. 2013

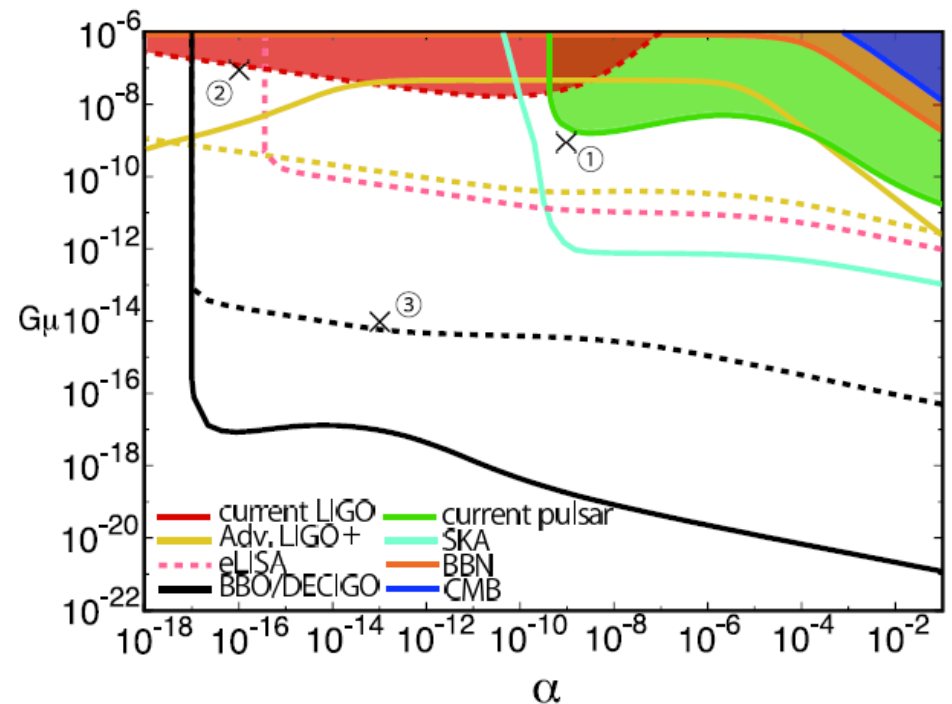
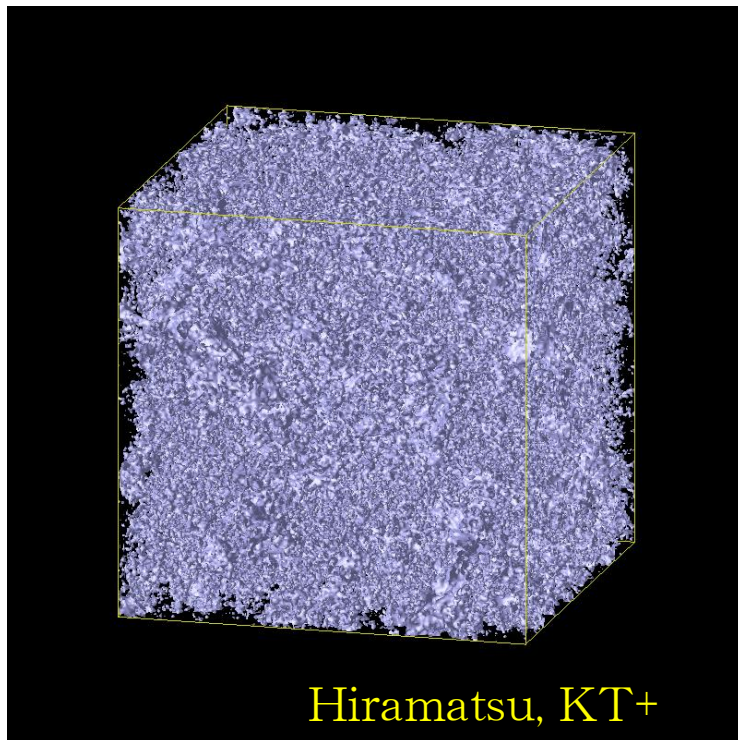


一部のモデルを制限しつつある！

宇宙ひも

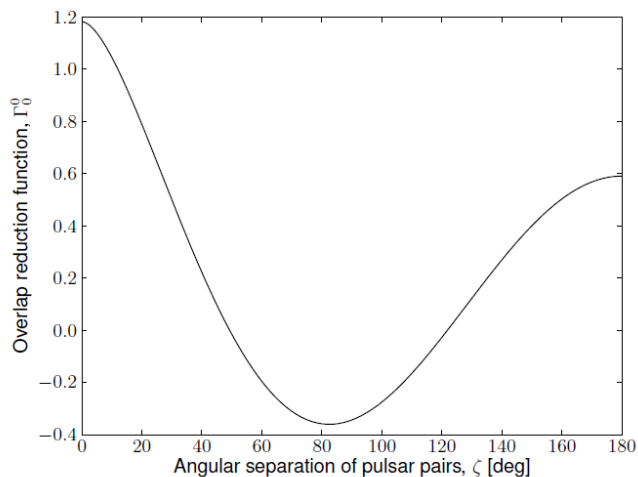
初期宇宙の相転移
超ひもが引き伸ばされる

黒柳、宮本、関口、高橋、Silk (2012) (2013)

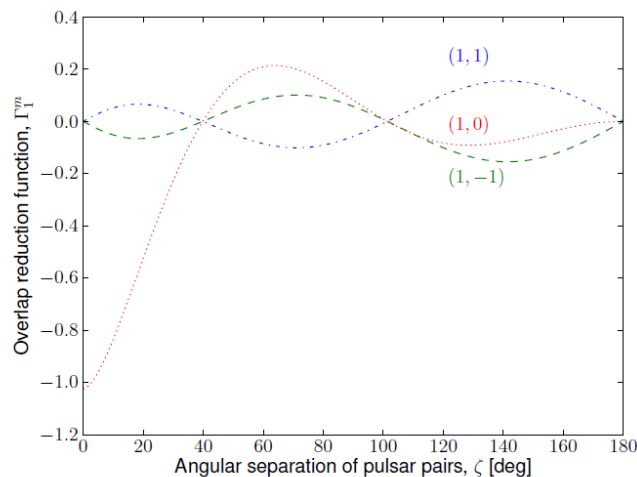


背景重力波の非等方性

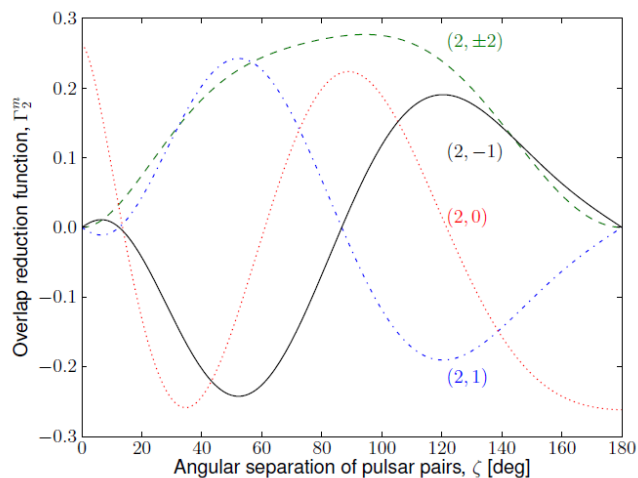
非等方性があるとHellings & Downs curveが変更される



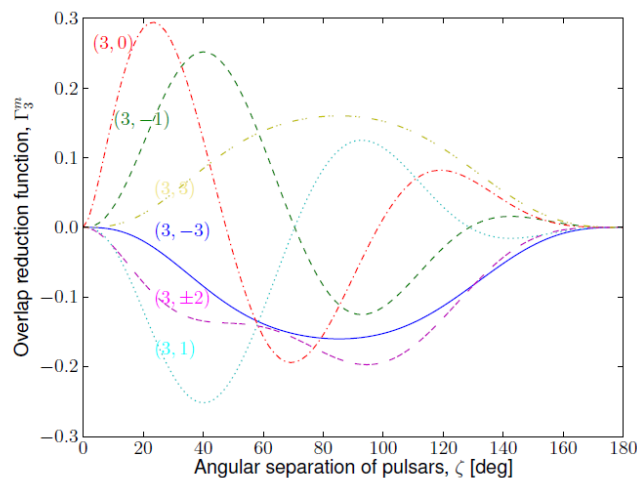
(a) Monopole ($l = 0$)



(b) Dipole ($l = 1$)



(c) Quadrupole ($l = 2$)



(d) Octupole ($l = 3$)

背景重力波の非等方性

観測手法はある程度確立されているが、使い道がほとんど議論されていない

- ・ 巨大BH連星であれ、宇宙ひもであれ、統計的に等方
 - ・ しかし源の個数は有限なので非等方性の分散はある
- 源が多く、遠い天体なら等方に近い
- 非等方性の観測により源の z 分布がわかる

「等方成分は積分量、非等方性はトモグラフィ」

日本のサイエンス

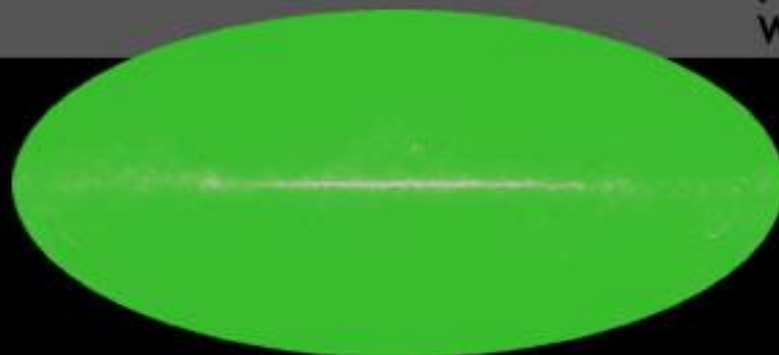
重力波背景放射の非等方性を使って

- ・ 巨大BHバイナリー質量関数・軌道半径分布の進化
 - ・ 宇宙ひもの数とループの大きさの進化
- を探る。

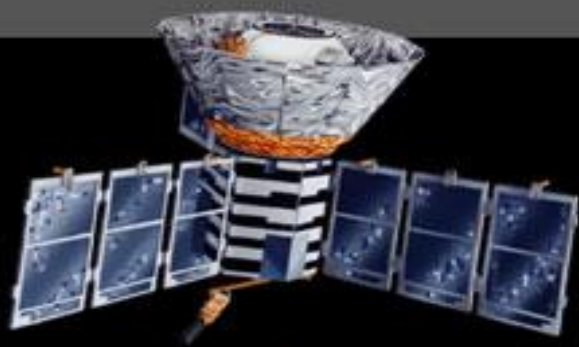
1965



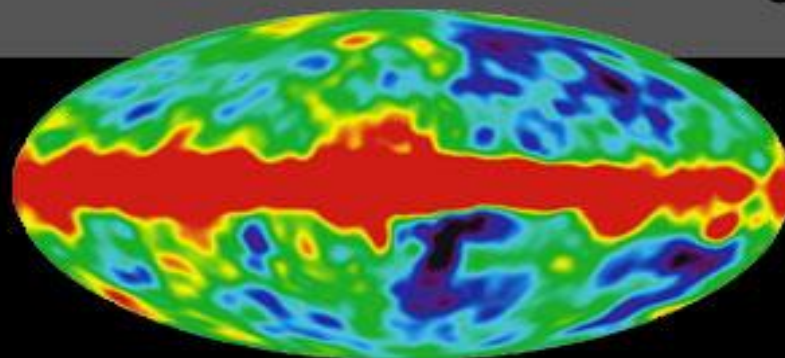
Penzias and
Wilson



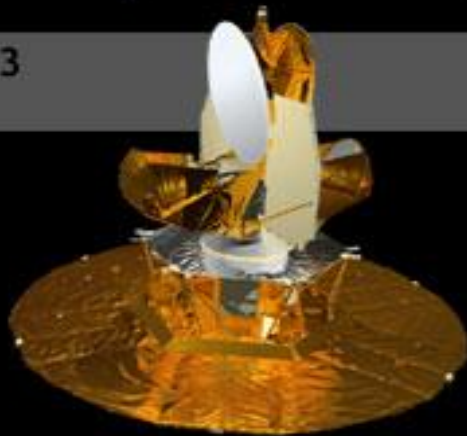
1992



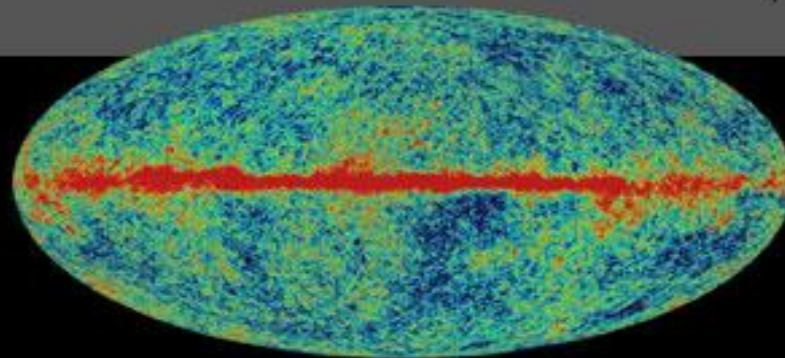
COBE



2003



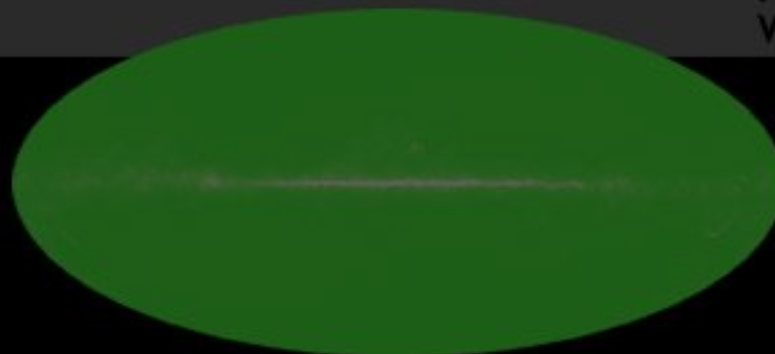
WMAP



1965

Penzias and Wilson

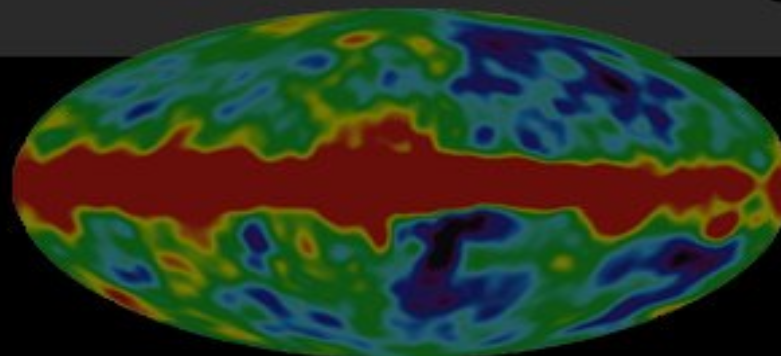
IPTA



1992

COBE

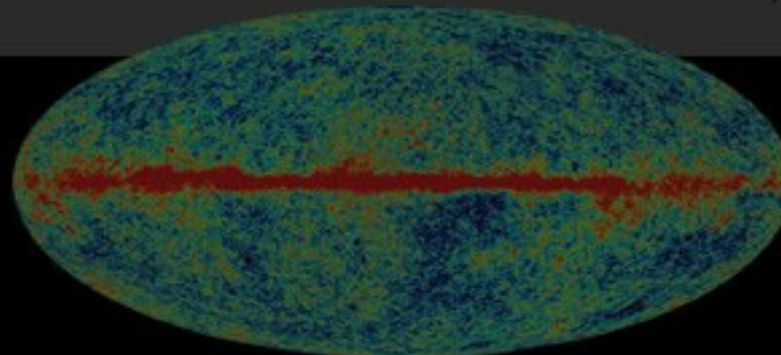
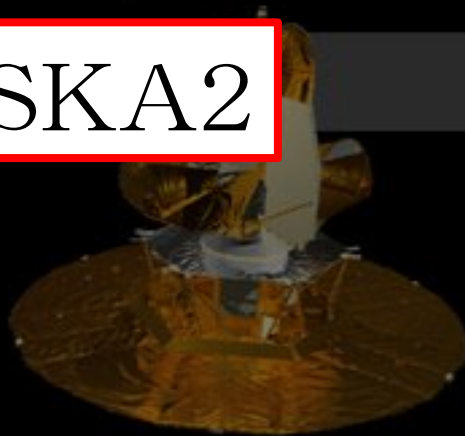
SKA1



2018

WMAP

SKA2



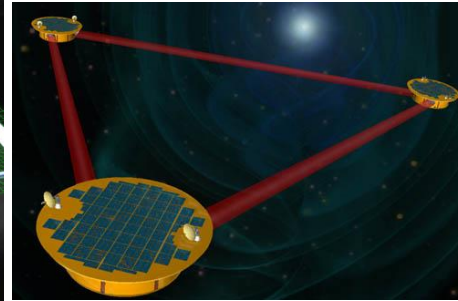
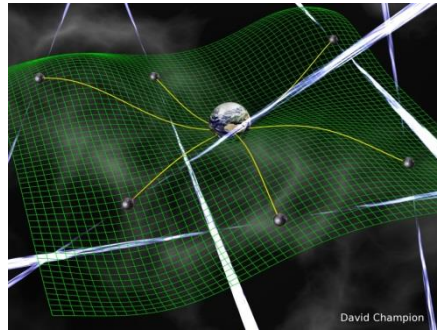
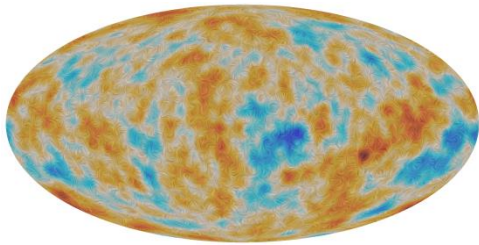
多波長重力波天文学

CMB

PTA

宇宙干涉計

地上干涉計



10^{-17}Hz

$\sim 1\text{nHz}$

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

100Hz

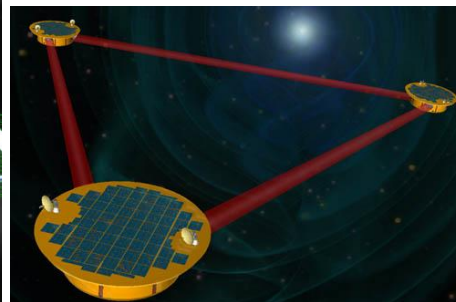
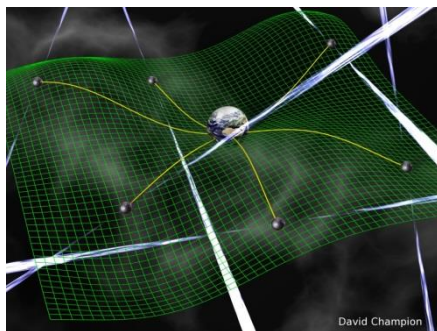
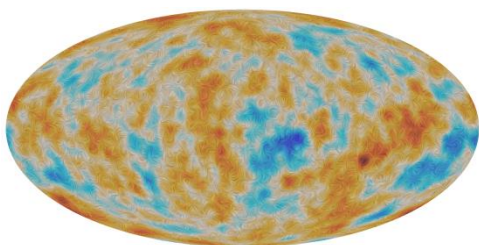
多波長重力波天文学

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

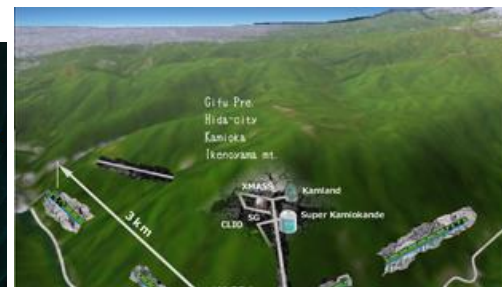
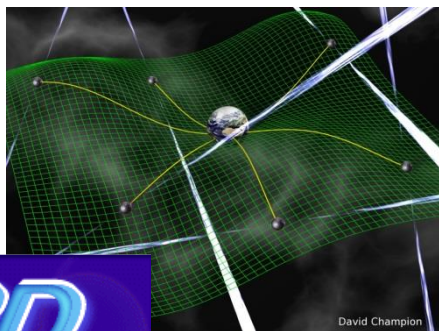
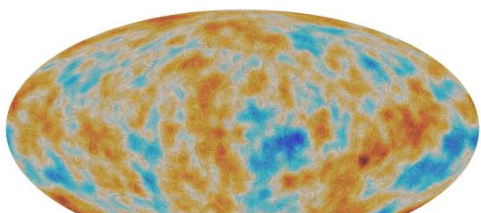


多波長重力波天文学

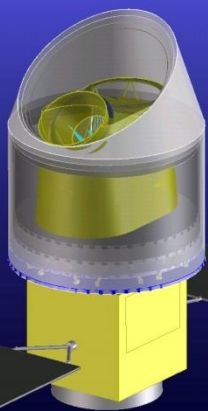
CMB

PTA

地上干渉計



LiteBIRD



巨大BH連星

KAGRA

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

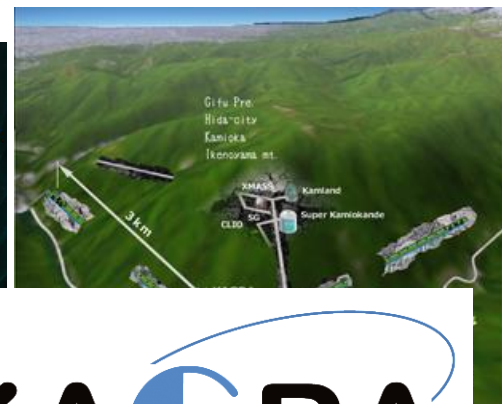
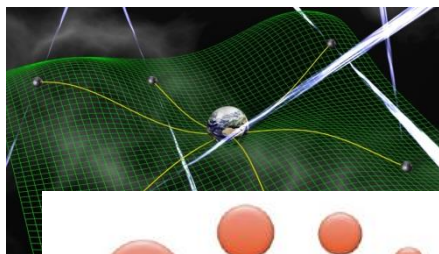
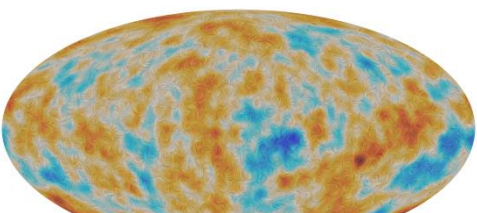


多波長重力波天文学

CMB

PTA

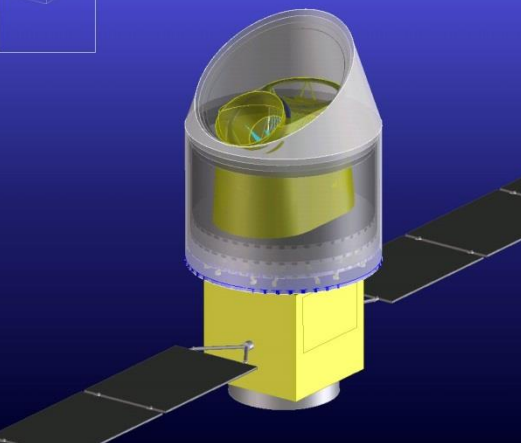
地上干渉計



LiteBIRD

SKA-JP
Square Kilometre Array
Japanese Consortium

KAGRA



4、銀河系磁場構造

銀河系の構造

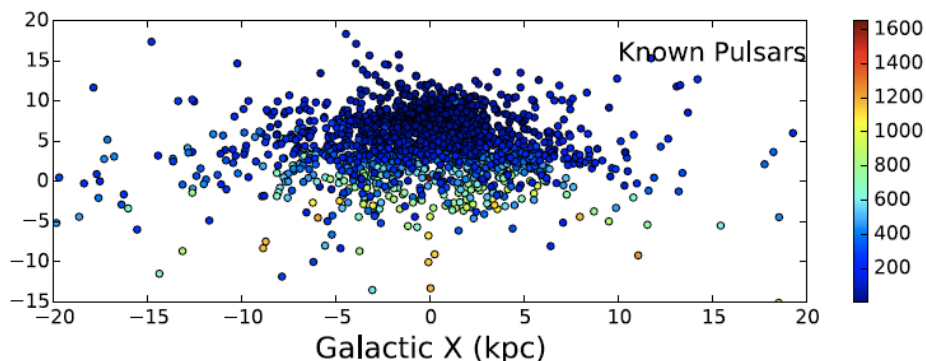
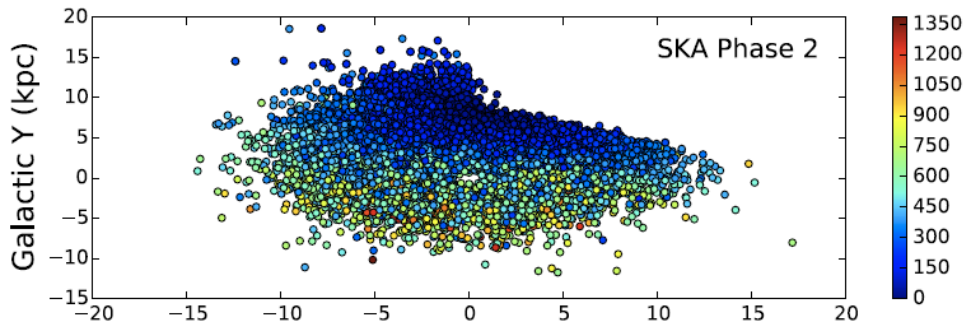
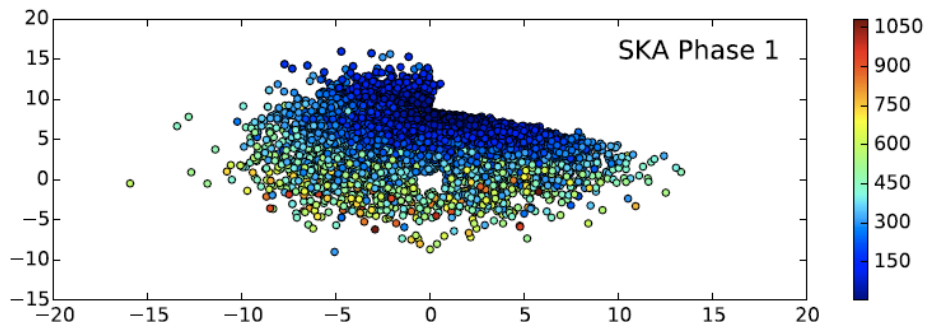
$$DM \sim \int n_e dx$$

$$RM \sim \int n_e B dx$$

astrometry \rightarrow d

\rightarrow n_e, B のトモグラフィ

\rightarrow 銀河系の3次元構造

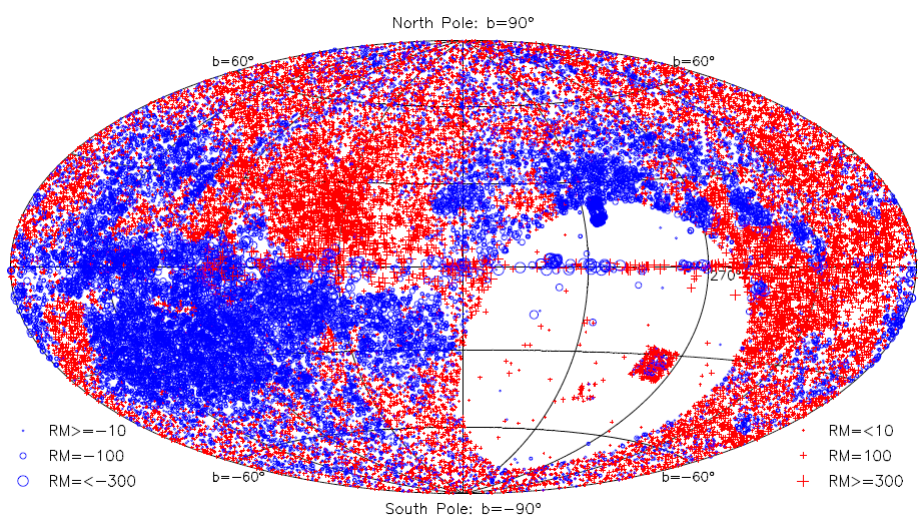


色 : DM

RM map

40000点のほとんどが系外

\rightarrow 積分のみ



日本のサイエンス

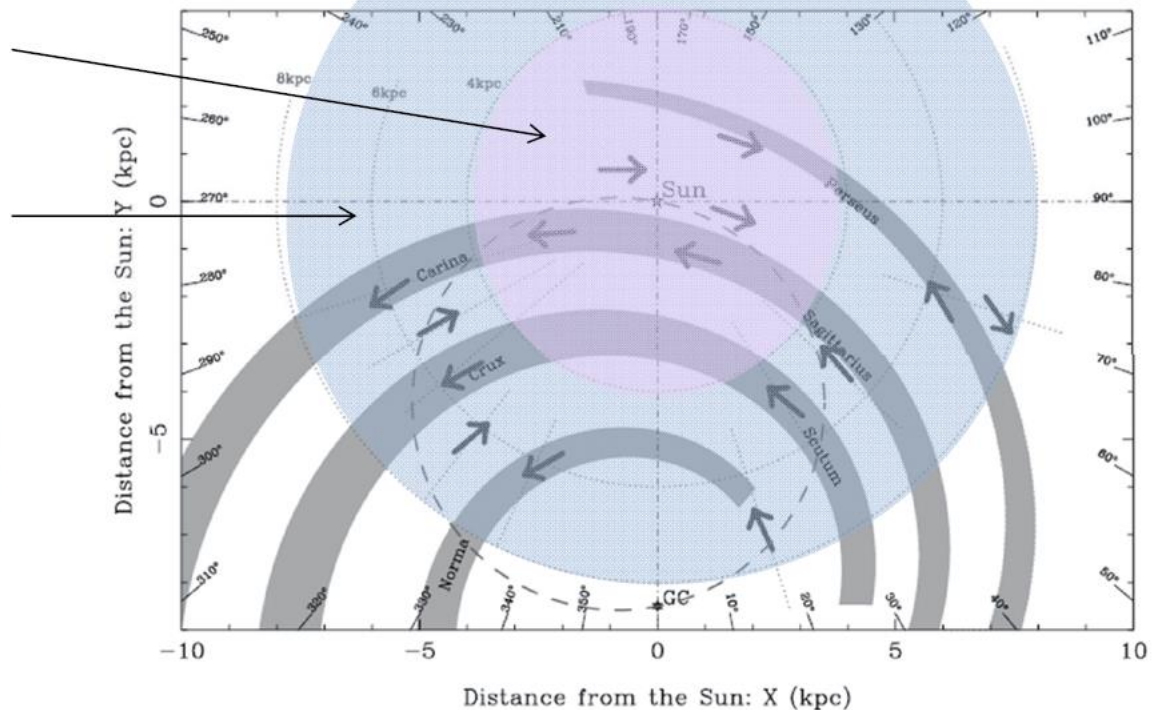
特に天球面上で近くにあるペアのRMを差し引けば
太陽系近傍の影響を避けられ、銀河磁場の構造を
調べられる。

大野さんスライド

$|b| < 10 \text{ deg}$ のパルサーを用い銀河面での分布を求める

- 1) $0 < d < 4 \text{ kpc}$
- 2) $2 < d < 6 \text{ kpc}$
- 3) $4 < d < 8 \text{ kpc}$
- 4) $6 \text{ kpc} < d$

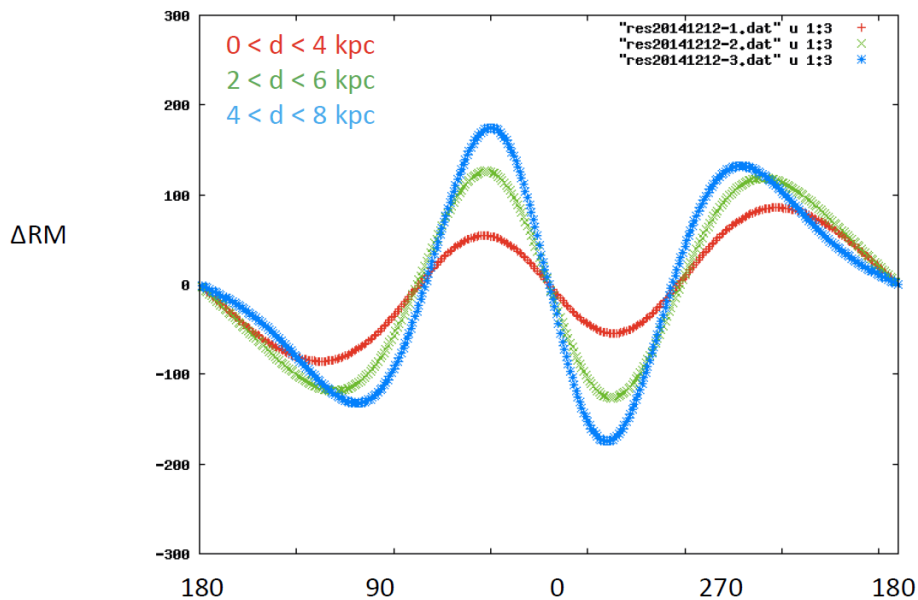
dパルサーの距離:
銀河系自由電子密度
分布モデルNE2001と
DMから評価



日本のサイエンス

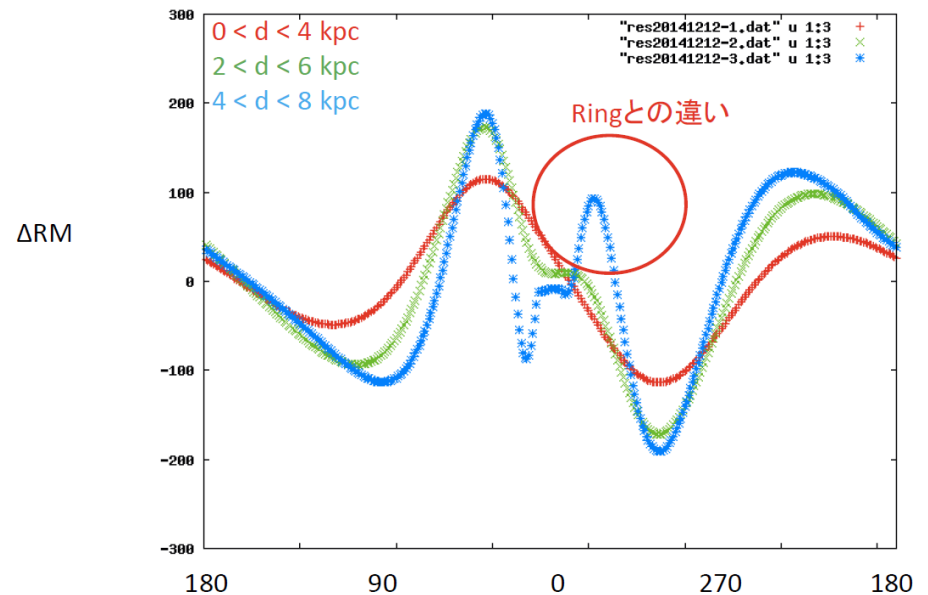
特に天球面上で近くにあるペアのRMを差し引けば
太陽系近傍の影響を避けられ、銀河磁場の構造を
調べられる。

リング状磁場



銀緯

BSS磁場



銀緯

5、一般相対論検証

成子さん講演参照

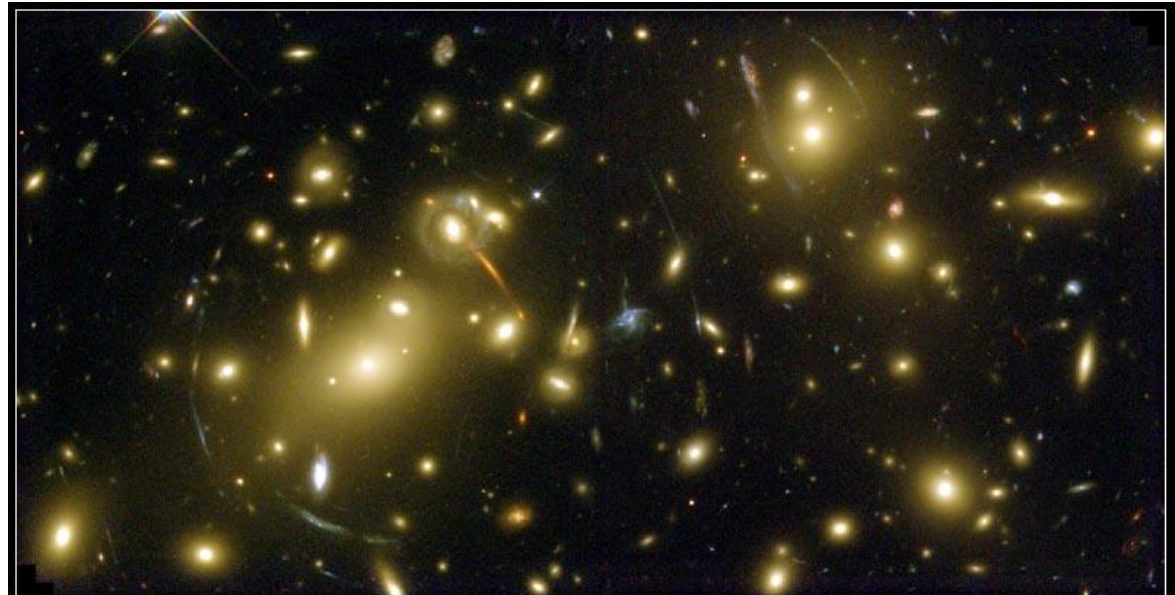
相対論の検証

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

● これまでは弱い重力場での検証

- ・ 水星の近日点移動
- ・ 太陽による光の曲がり

→ ブラックホールという極限的な系でも一般相対論は
なりたつのか？



Galaxy Cluster Abell 2218

HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

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

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
- ・ミクロな世界の重力：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)

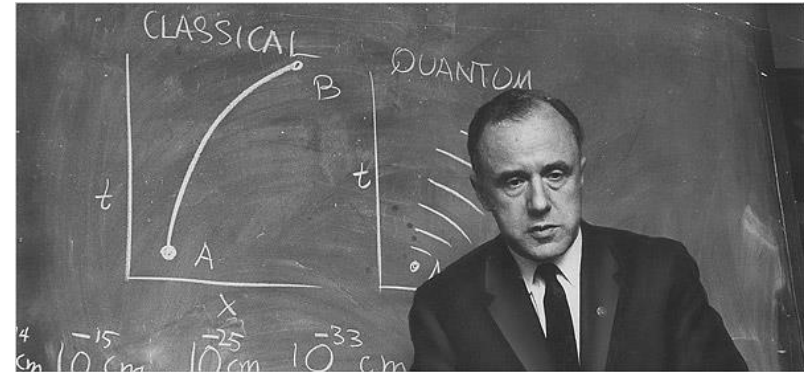
$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\zeta R - \eta (\nabla\phi)^2 + \beta G^{\mu\nu} \nabla_\mu \phi \nabla_\nu \phi - 2\Lambda \right]$$

相対論の検証

ブラックホールの基本的な定理

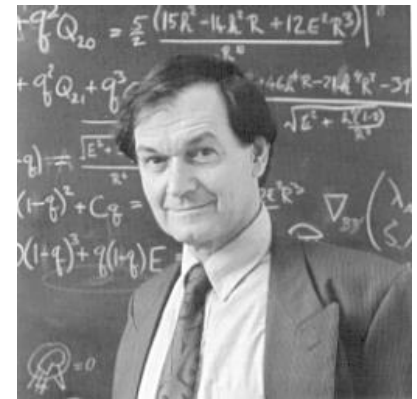
- no-hair theorem

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)

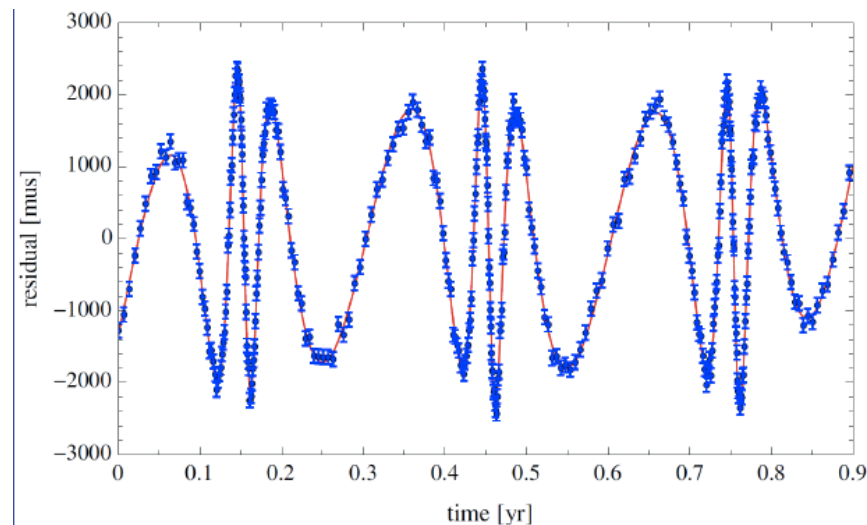
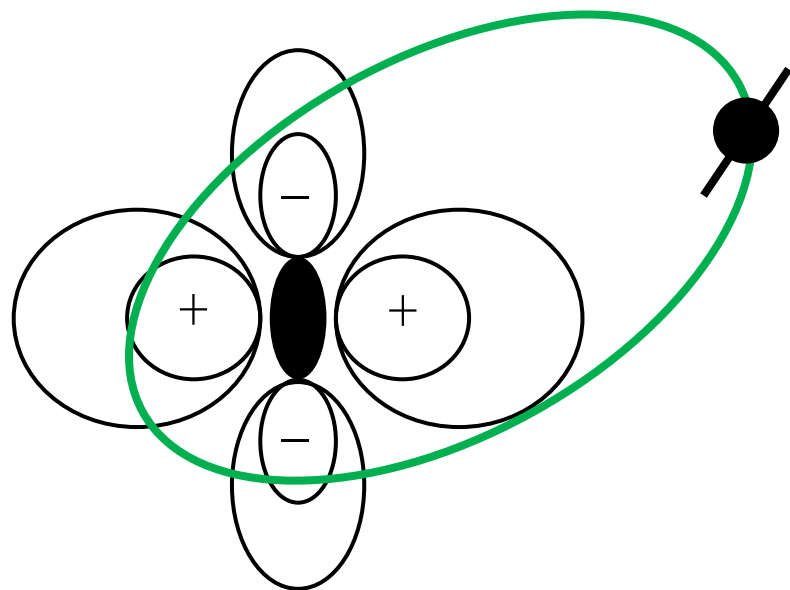
→ パルスのタイミング

→ 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？



ブラックホールの形を測る

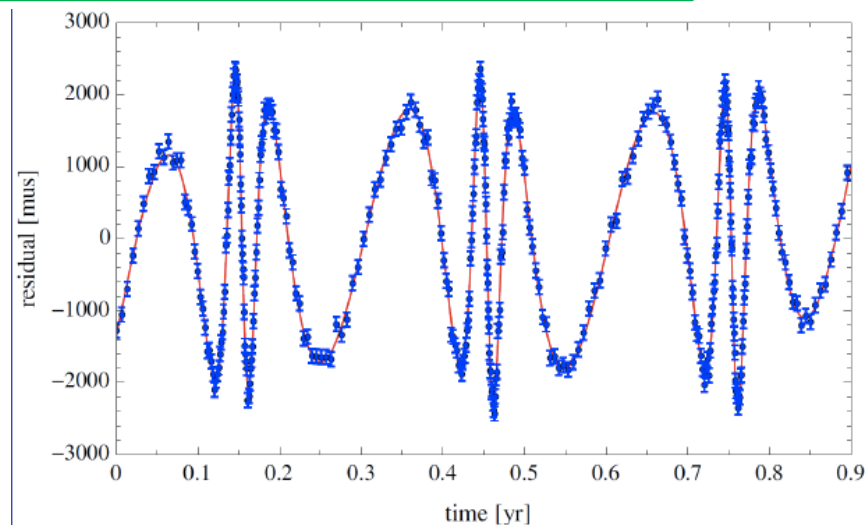
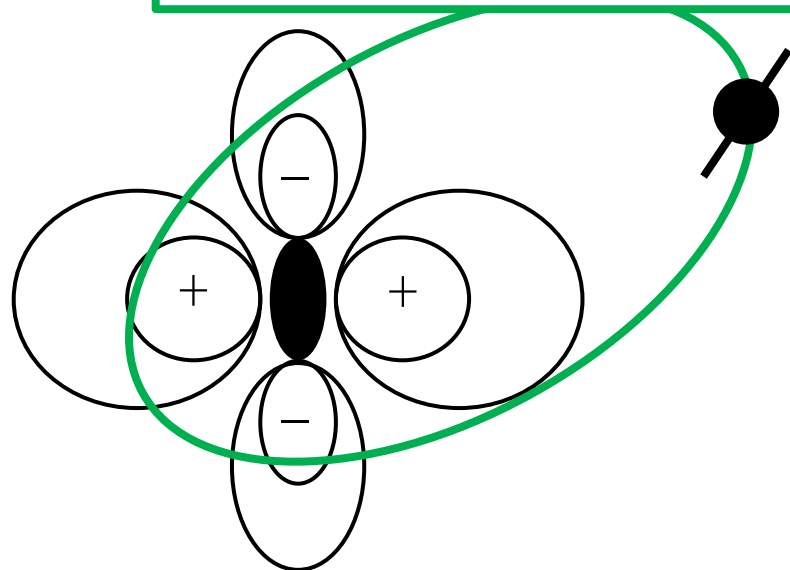
銀河中心の巨大ブラックホール近傍のパルサー (1mpc)

→ 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

一般相対論を
真に一般相対論らしいもので検証



日本のサイエンス

様々な修正重力理論で回転ブラックホール解を見つける

- ・ 四重極と質量、スピンの間の関係を求める
- ・ スピンの上限を求める

→ どの精度で検証すればどの理論が棄却されるかを整理

回転解を得るのは非常に難しい

- ・ 弱い回転を摂動的に入れる
- ・ 数値解
- ・ これまでモチベーションがなかったのであまり探索されてこなかった

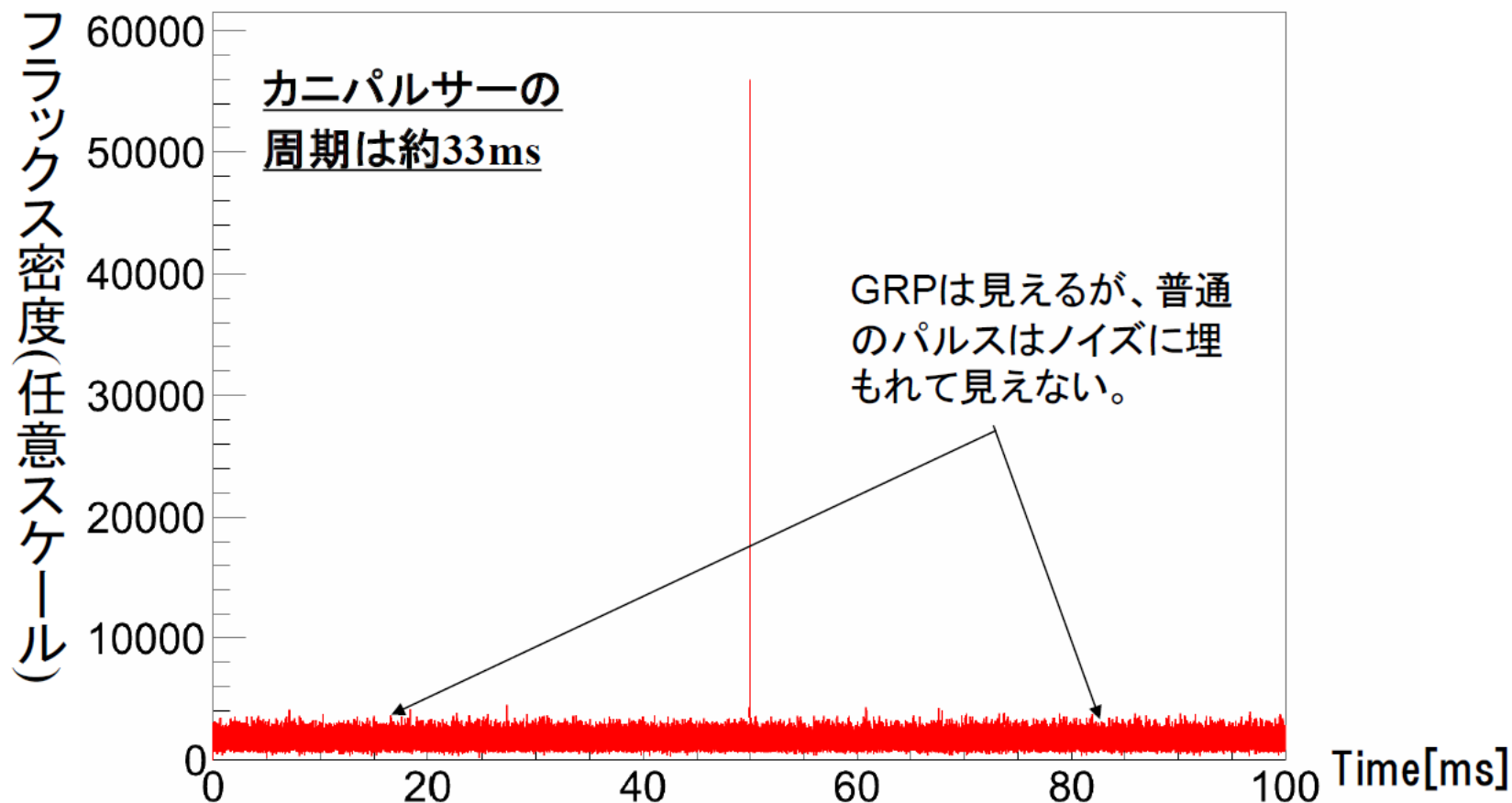
→ 相対論業界に新たなモチベーション！

6、Giant Radio Pulses

三上さん講演参照

Giant Radio Pulses

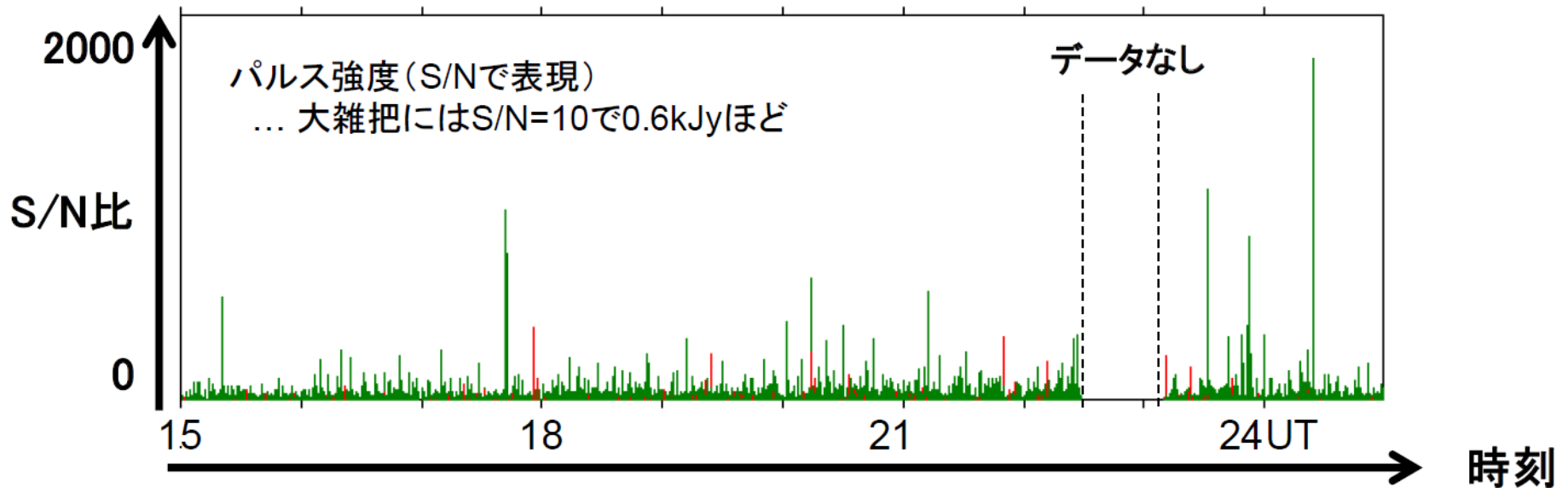
三上さんのスライドより



Giant Radio Pulses

三上さんのスライドより

2011/9/1鹿島1.4GHz帯観測の例 約9時間分のデータ

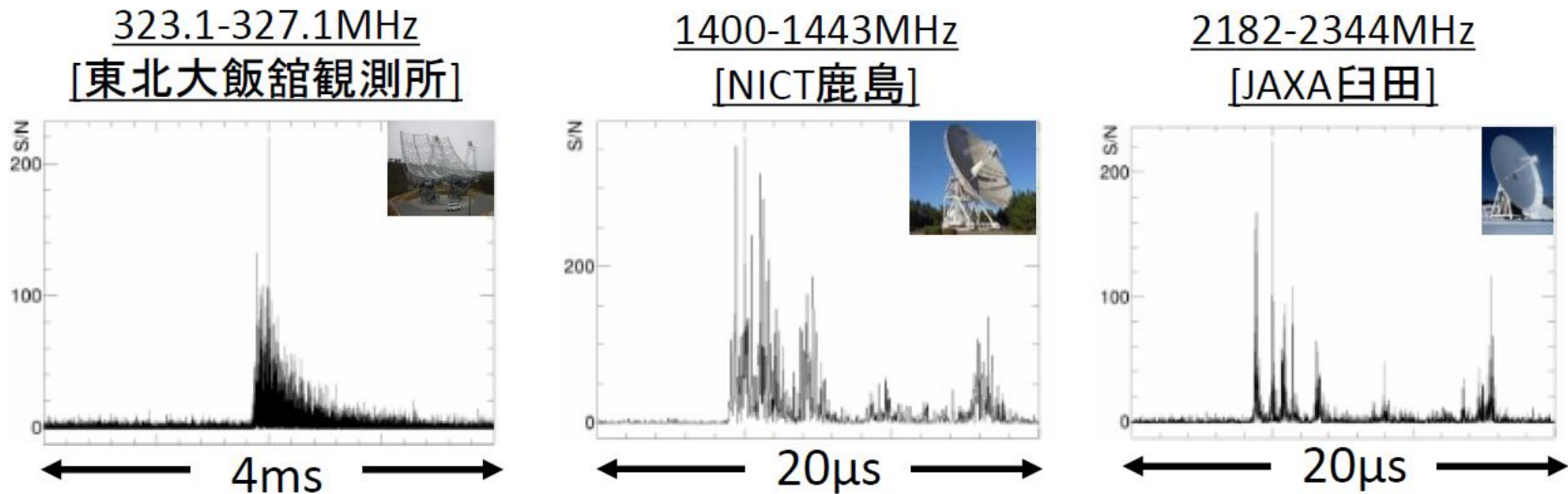


通常のパルスは重ね合わせないと見えない
→ 平均化されたパルスしか見えない
GRPは1個で見える
→ そのものが見える

Giant Radio Pulses

三上さんのスライドより

2014/6/1 03:54:31UTC頃に3地点で同時観測されたカニパルサーGRP



ナノ秒スケールの構造がある

→ 30cmの構造が見える！

→ 放射機構・プラズマ構造にせまる

Giant Radio Pulses

三上さんのスライドより

2014/6/1 03:54:31UTC頃に3地点で同時観測されたカニパルサーGRP

323.1-327.1MHz

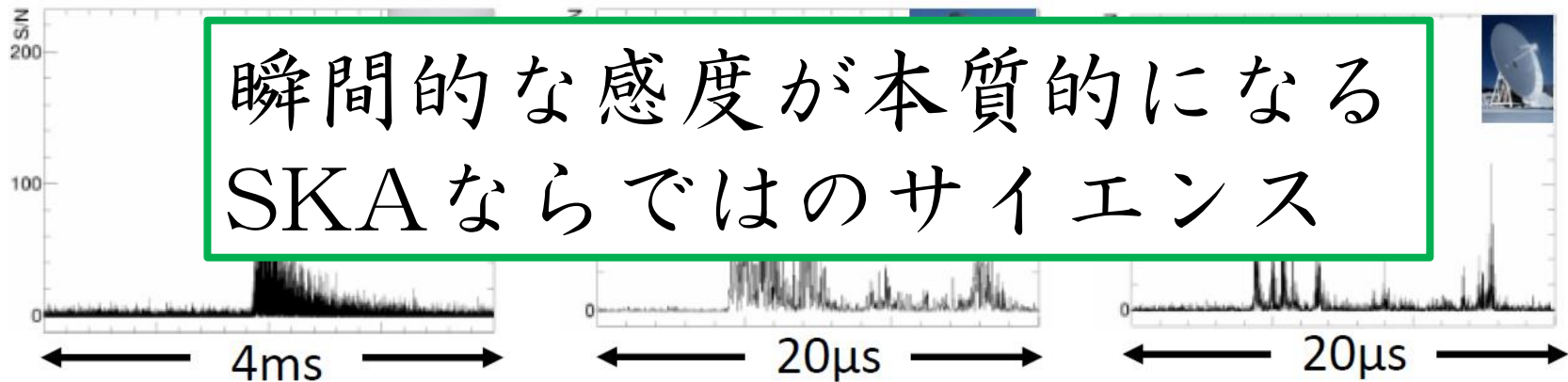
[東北大飯舘観測所]

1400-1443MHz

[NICT鹿島]

2182-2344MHz

[JAXA臼田]



ナノ秒スケールの構造がある

→ 30cmの構造が見える！

→ 放射機構・プラズマ構造にせまる

7、まとめ

まとめ

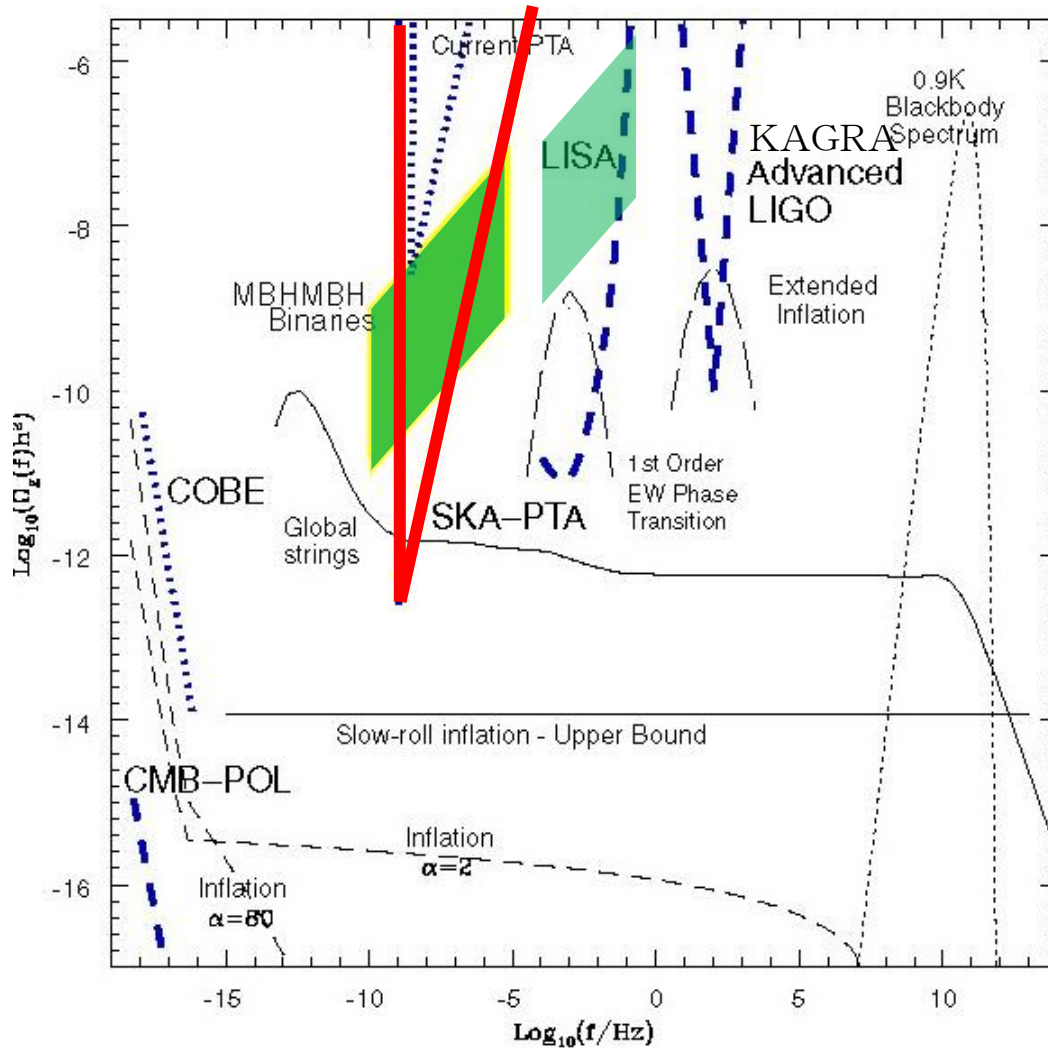
SKA1ハイライトの1つ

- ・パルサー国勢調査
- ・パルサーを用いた基礎物理の探索
(重力波、一般相対論、核物質)
- ・パルサー磁気圏、パルサー風
- ・銀河系構造

日本のサイエンス

- ・背景重力波の異方性検出、個々の源検出
- ・パルサーペアによる銀河系磁場の探索
- ・修正重力理論の探索
- ・Giant Radio Pulse

重力波スペクトル



ターゲット

- ・ 巨大BHバイナリ
→ 銀河衝突史
巨大BH形成史
- ・ 宇宙ひも
→ 素粒子・初期宇宙

多波長重力波天文学

- ・ マイクロ波背景放射
- ・ パルサータイミング
- ・ スペース望遠鏡
- ・ 地上望遠鏡