

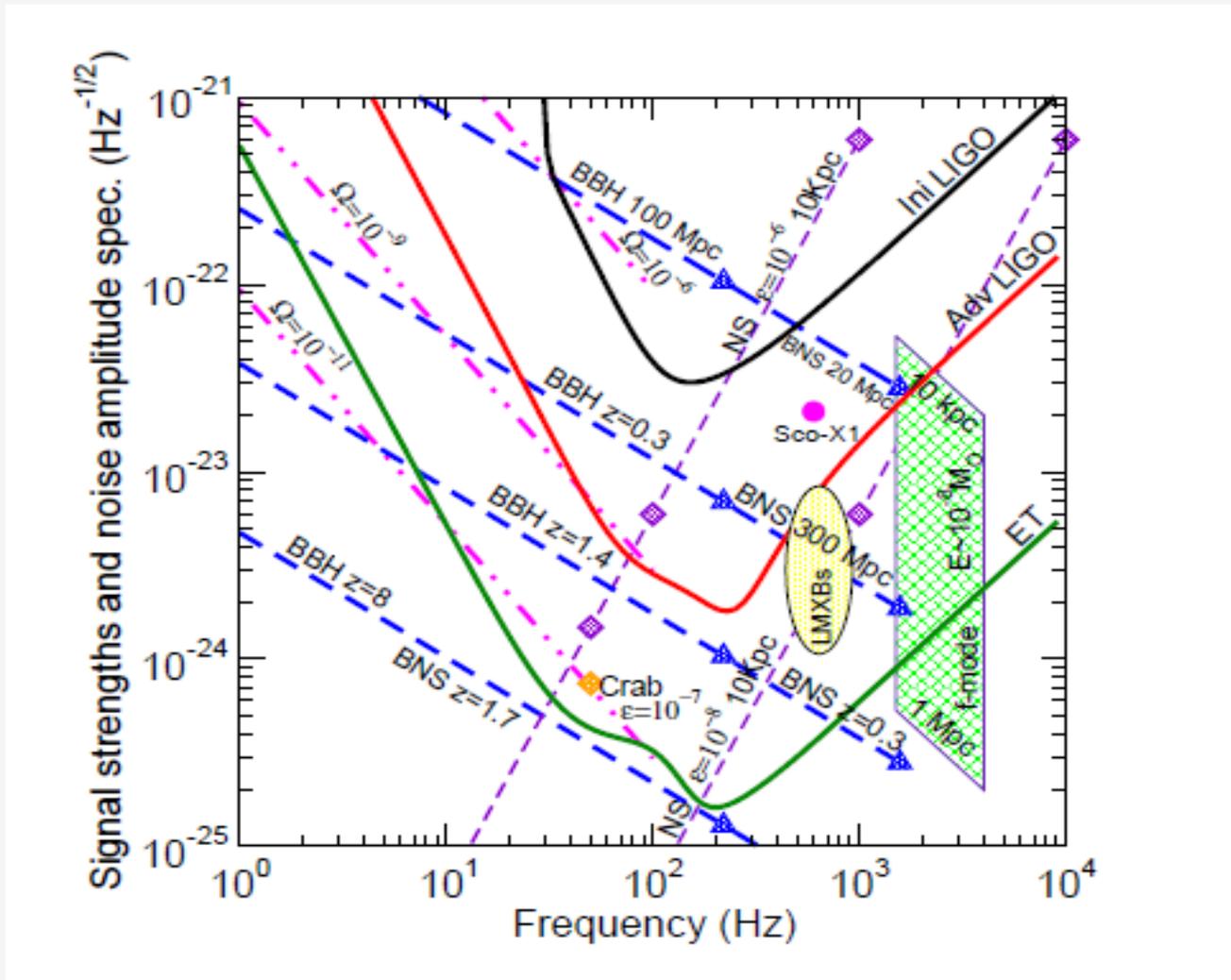
データ解析の基礎

伊藤 洋介
東大RESCEU

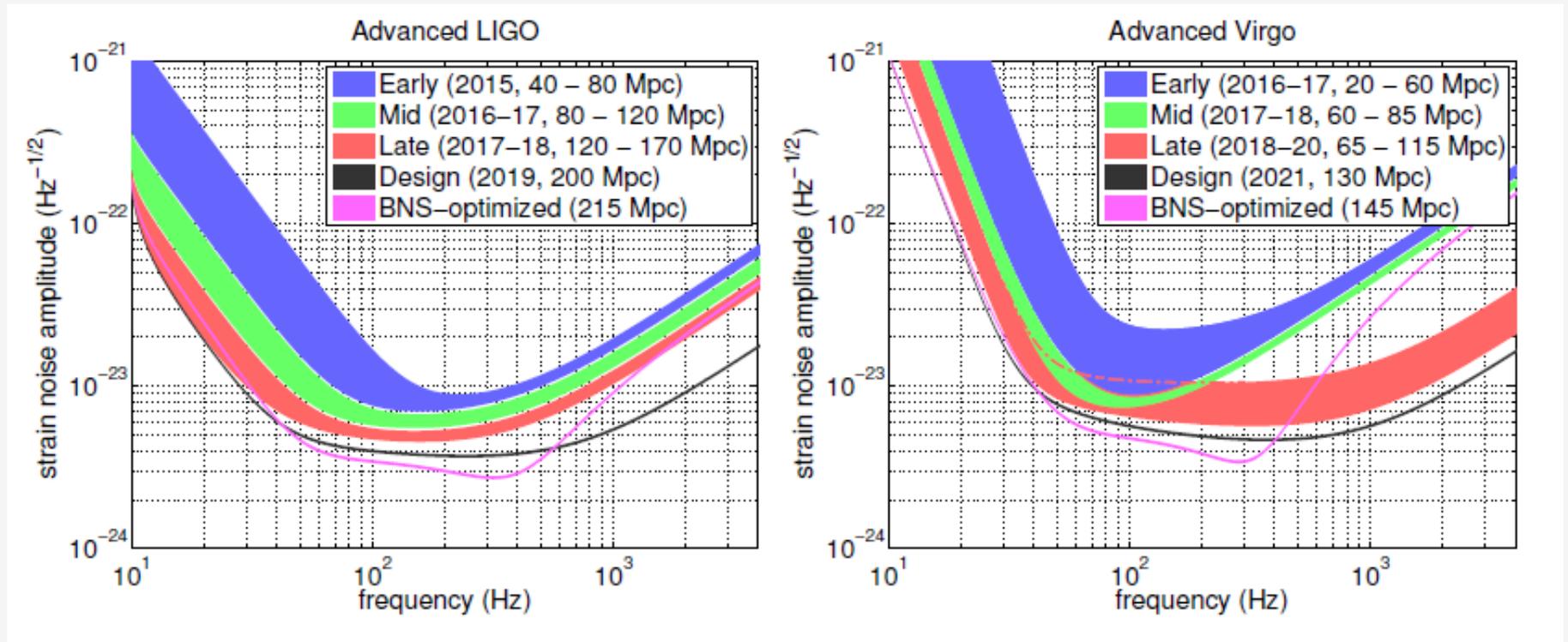
Part1 概観

- ✓ 将来
- ✓ 現在
- ✓ なぜデータ解析？

地上検出器と期待される波源



aLIGO/aVIRGOの期待感度曲線



Arxiv: 1304.0670

LV検出可能性

Arxiv: 1304.0670

Epoch	Estimated Run Duration	$E_{\text{GW}} = 10^{-2} M_{\odot} c^2$ Burst Range (Mpc)		BNS Range (Mpc)		Number of BNS Detections	% BNS Localized within	
		LIGO	Virgo	LIGO	Virgo		5 deg ²	20 deg ²
2015	3 months	40 – 60	–	40 – 80	–	0.0004 – 3	–	–
2016–17	6 months	60 – 75	20 – 40	80 – 120	20 – 60	0.006 – 20	2	5 – 12
2017–18	9 months	75 – 90	40 – 50	120 – 170	60 – 85	0.04 – 100	1 – 2	10 – 12
2019+	(per year)	105	40 – 80	200	65 – 130	0.2 – 200	3 – 8	8 – 28
2022+ (India)	(per year)	105	80	200	130	0.4 – 400	17	48

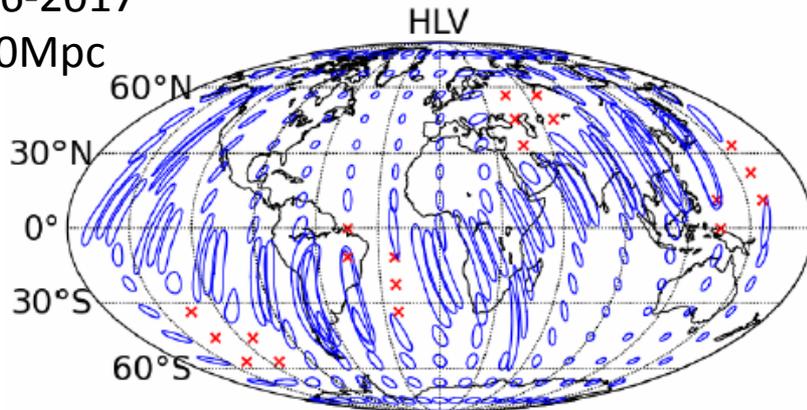
$1e-8 \sim 1e-5$ /Mpc³/yr, 80 %
duty cycleとして計算

Cf: Initial LIGO: 平均~ 15 Mpc (up to the VIRGO cluster), Rate: ~1/50 yearsを期待していた。

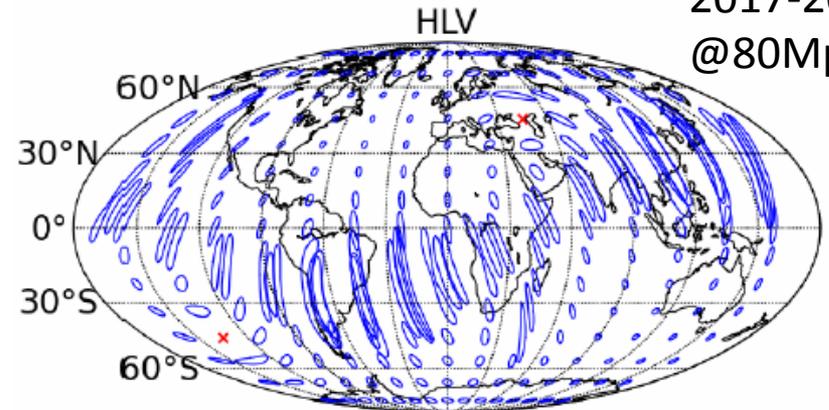
方向決定精度(90 % CL)

Arxiv: 1304.0670

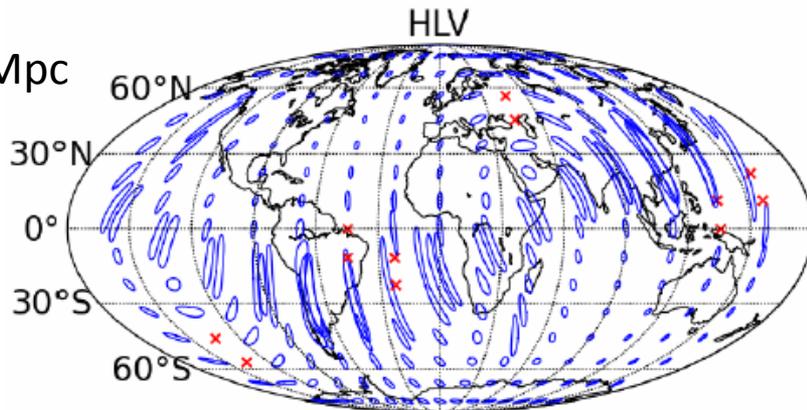
2016-2017
@80Mpc



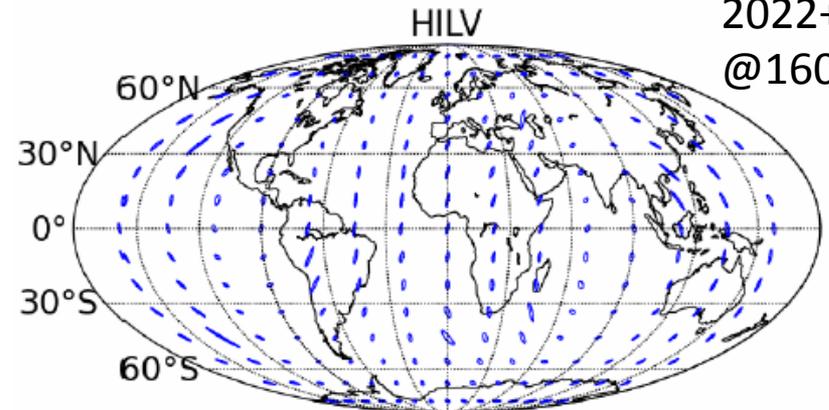
2017-2018
@80Mpc



2019+
@160Mpc



2022+
@160Mpc



ただし、最初の1~2年は、LIGO2台のみなので、方向決定精度は数百平方度程度。
さらに、4台無いと方向を1つに絞れない→ KAGRA/LIGO-Indiaの重要性。

The 2013–23 Crystal Ball

- 2013–2015: Advanced LIGO upgrade continues.
 - Commissioning and science runs alternate from 2015 on.
- 2013–2016+: Advanced Virgo upgrade continues.
 - Virgo joins LIGO science runs in 2016–17.
- 2013+: PTAs pool data, increase number of SMBs.
- 2015: iKAGRA science run.
- 2015–2020: Pulsar timing arrays get first nHz detection.
- 2015: LISA Pathfinder launched.
- 2016–2020: Advanced IFOs get first 100 Hz detection.
- 2017: LISA confirmed by ESA for 2028 launch.
- 2017: CMB: first measurement of Ω_{gw} at $z \sim 1000$.
- 2018: KAGRA data at Advanced-level sensitivity.
- 2018: ET approved in Europe, construction begins 2020.
- 2020: LIGO-India data at Advanced-level sensitivity.
- 2020+: Advanced detectors upgrade to 2.5G sensitivity, PTAs/SKA study individual SMBH binary systems.

Population of SMBHS at $10^9 M_{\odot}$.

Pop of mergers: NS-NS, BH-BH ($< 100 M_{\odot}$)
Assoc. w GRBs. Poss GWPSR.

Confirm inflation, restrict models

More events, identifications.
Hubble const measured to 1%

Even more events & IDs. Good
tests of GR: Kerr, GW propagation

GWPSRs, stochastic, cosmic strings,
unexpected events all more likely.

Taken from B. F. Schutz talk
at YKIS 2013 (June, 2013)

Science概観

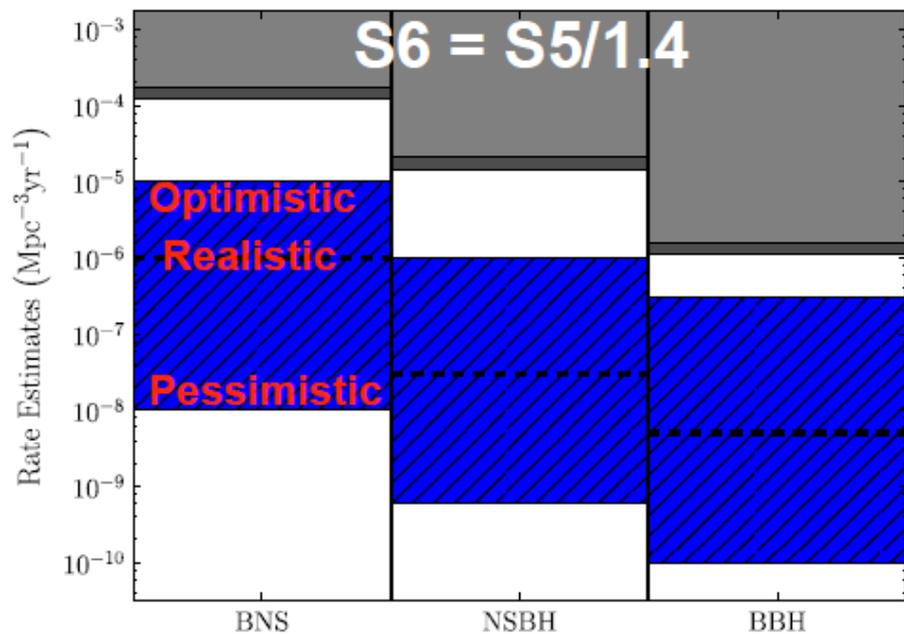
今までもいろんなことがやられています。

Compact Binary Coalescence

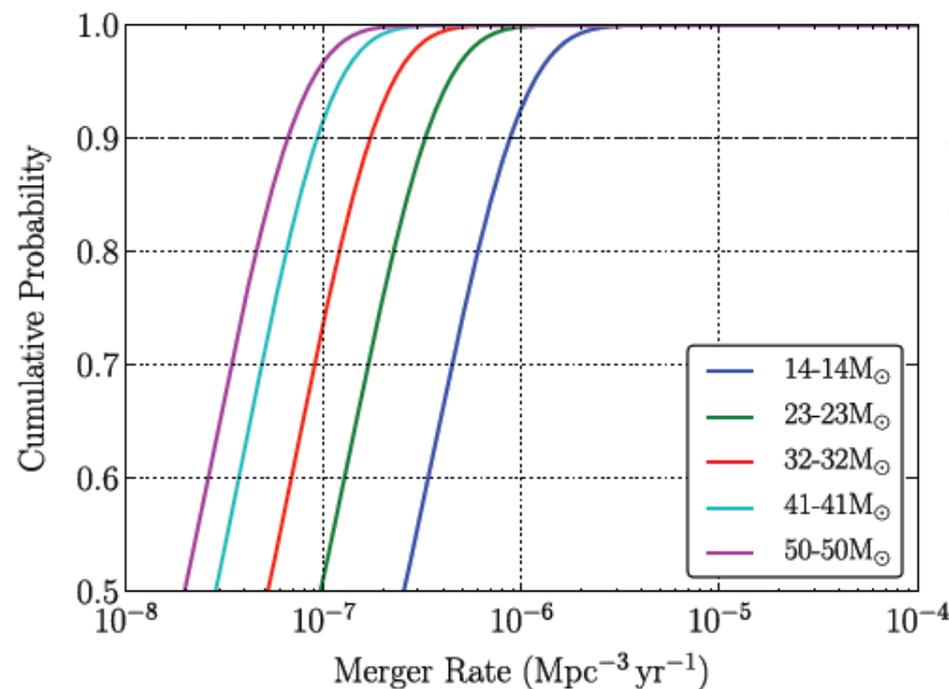
S6/VSR2,3 search



Aasi *et al*, PRD 87, 022002 (2013)



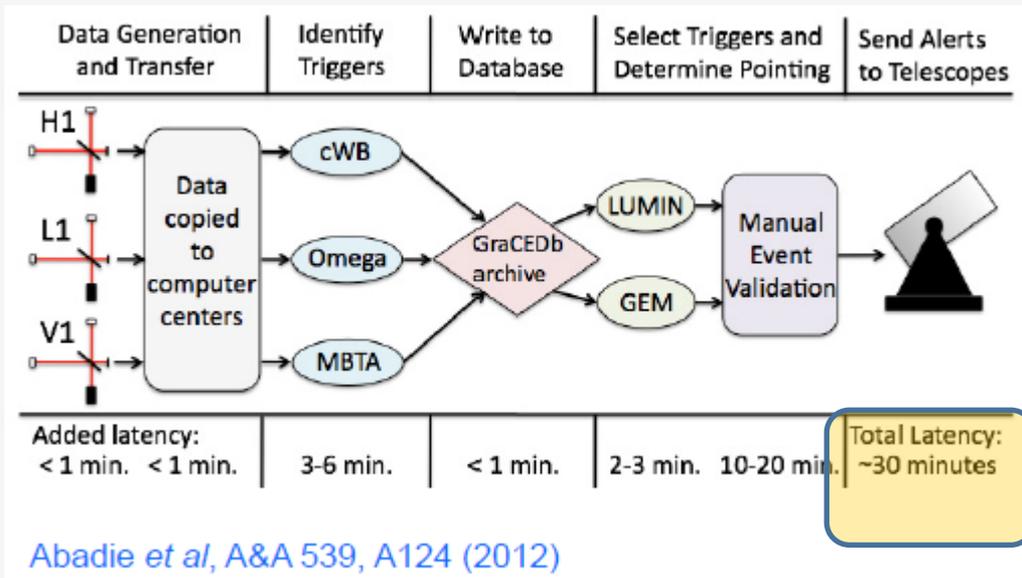
Abadie *et al*, PRD 85, 082002 (2012)



Multi-messenger Astronomy

- BNS, NS/BH, SNe, GRBでは $\nu\gamma$ 対応天体が期待される。
- 特に、CBC, Burst (SNe, GRB)で研究/協力が進んでいる。
- Low-latency 探索が重要。なるべく短い時間(1分以内程度)にGW \rightarrow $\nu\gamma$ 望遠鏡で 警報をやりとりする。
- LIGO-VIRGOはGW検出からのアラート発行システムの運用実績を持っている。Arxiv:1109.3498

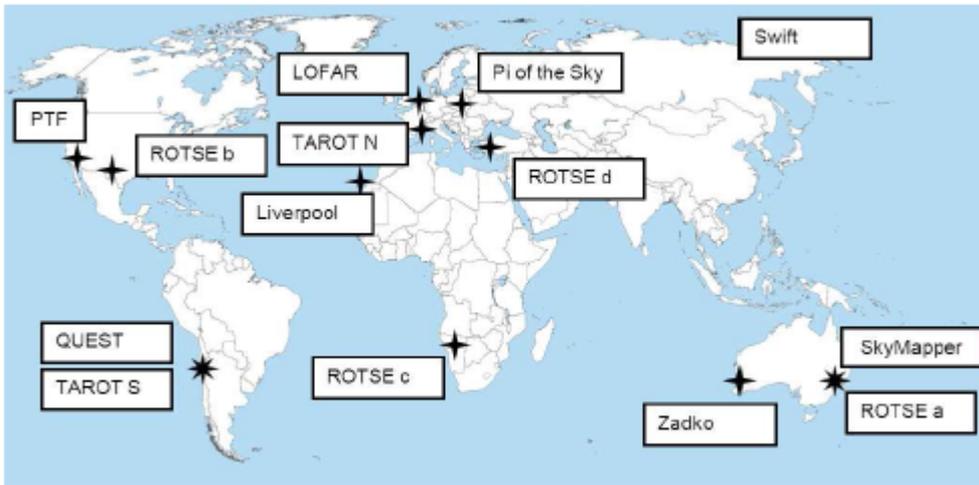
Low latency search



1分程度を目標にしている。

- Multi-messenger Astronomyのために、 $\nu\gamma$ 天文学とイベントアラートのやりとりをおこなう。FARを下げること、方向決定精度の向上、計算速度が課題。
- もちろん、Middle latency search, off-line searchもおこなう。
 - Middle latency search (1 day): Detchar チームへのfeedback. 計算資源の必要な探索。
 - Off-line search (1 week – 1month): 計算資源の必要な探索、精度の高いパラメータ探索、GRのテストなど、様々な物理。

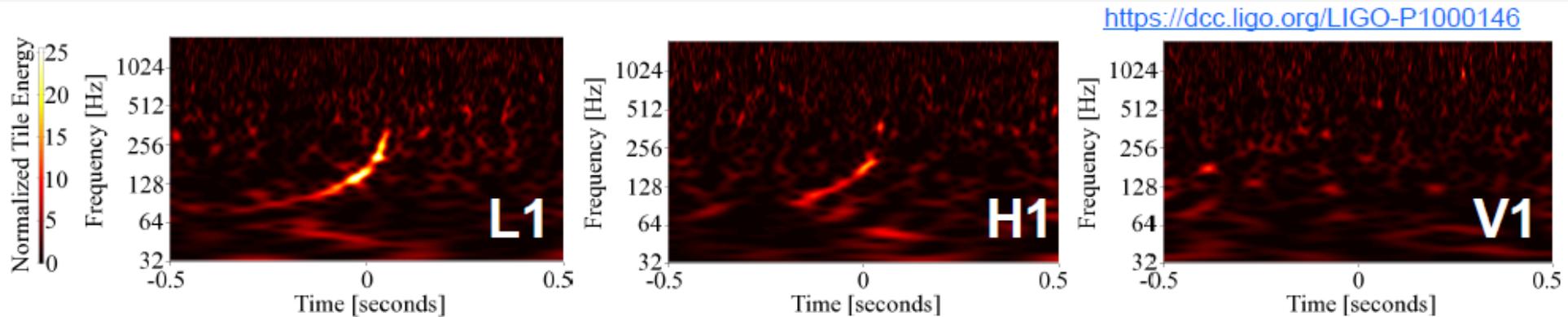
Multi-messenger Astronomy



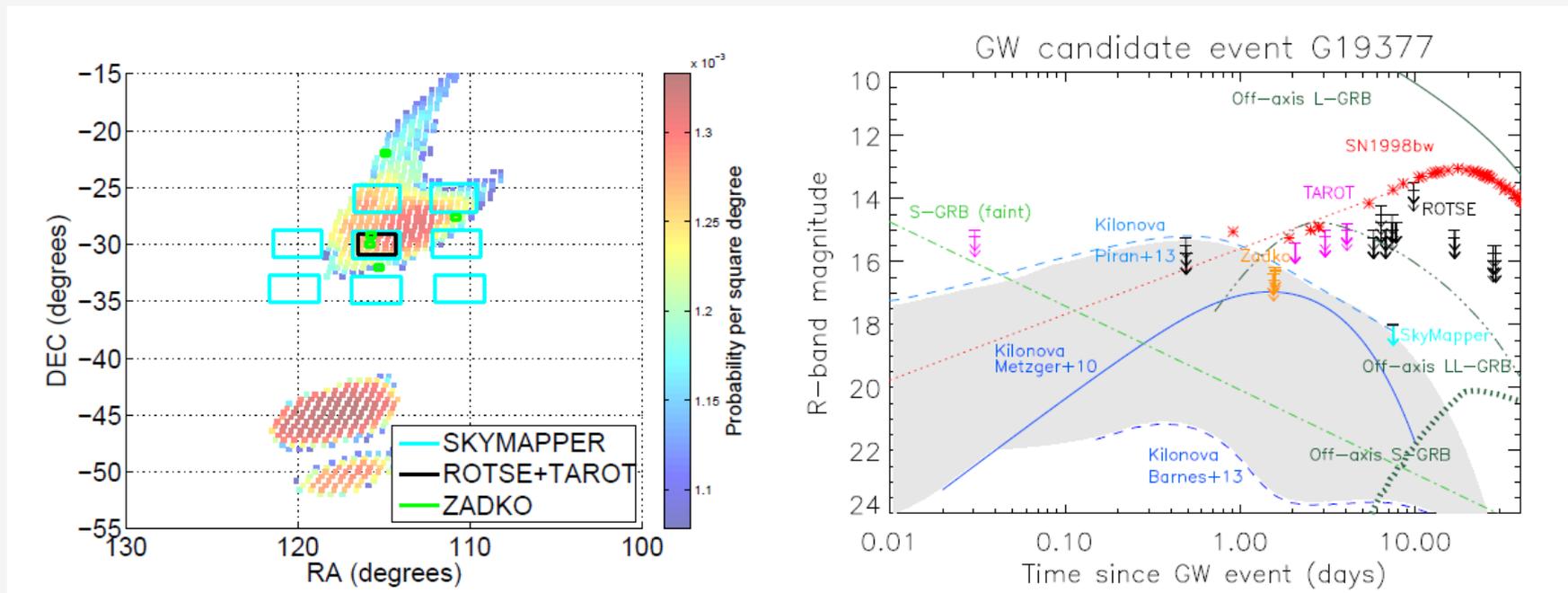
Arxiv:1109.3498

Name	Band	FOV (square degrees)	Aperture (m)	Exposure Time (s)	Limiting Magnitude
Palomar Transient Factory	Optical	7.3	1.2	60	20.5
Pi of the Sky	Optical	400	0.072	10	11.5
QUEST	Optical	9.4	1	60	20
ROTSE III	Optical	3.4	0.45	20	17.5
SkyMapper	Optical	5.7	1.35	110	21
TAROT	Optical	3.4	0.25	180	17.5
Zadko Telescope	Optical	0.15	1	180	20
Liverpool Telescope	Optical	0.0058	2	3600	21
LOFAR	Radio	~25	N/A	14400	N/A
Swift	X-ray	0.15	N/A	200-5000	N/A
Swift	UV, Optical	0.078	0.3	200-5000	24

CBC S6/VSR2 “the big dog”

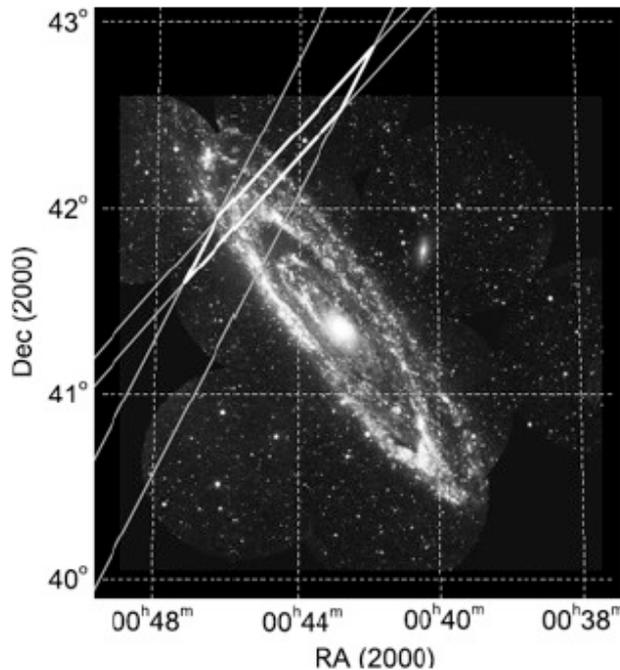


Arxiv:1310.2314



EM Trigger: Gamma Ray Bursts

GRB 070102 and GRB 051103



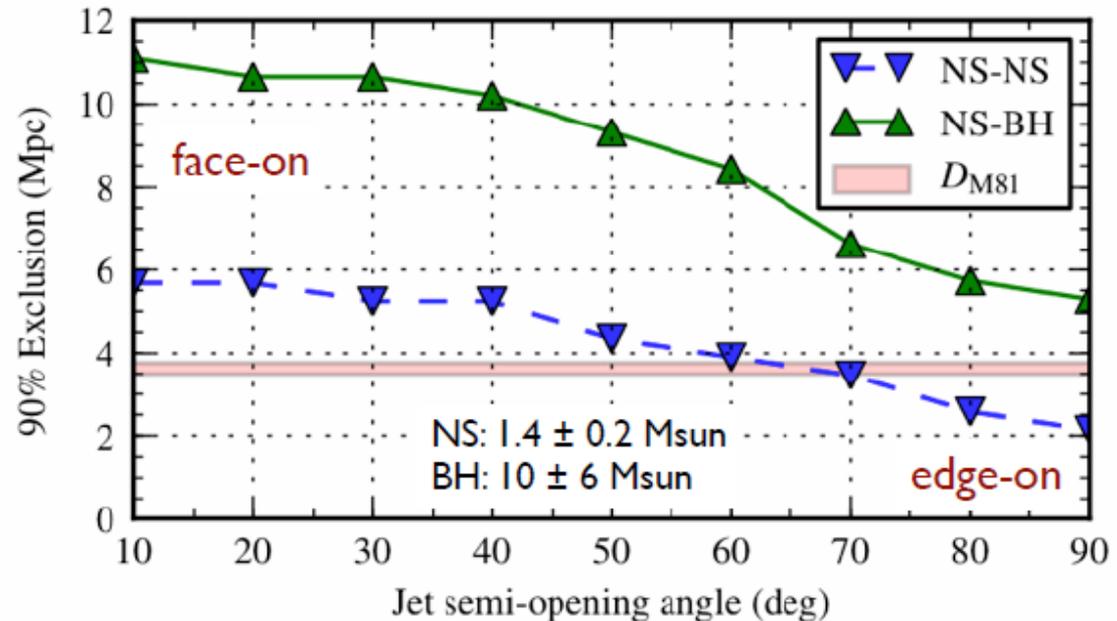
070201: Consistent with M31
(Andromeda, 770 kpc)
Binary coalescence excluded at
>99% CL

Most likely an SGR flare

ApJ 681 (2008) 1419

051103: Consistent with M81 (3.6 Mpc)
Binary coalescence excluded at 98% CL
for opening angles up to 30deg.
Cannot rule out SGR progenitor
($< 10^{51} - 10^{55}$ erg)

ApJ 755 (2012) 2

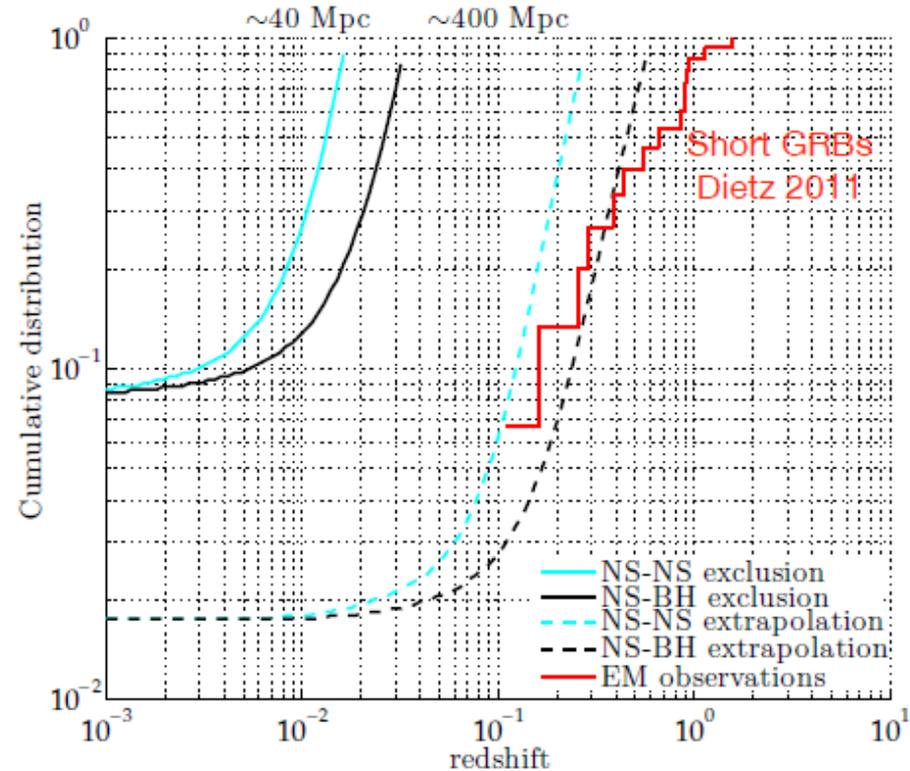
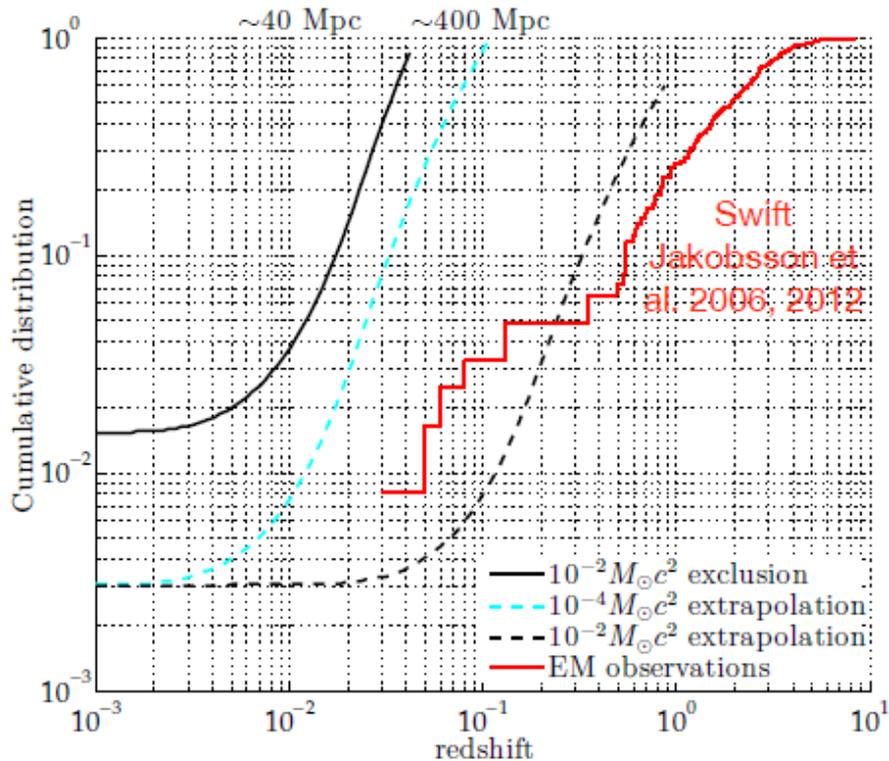


EM trigger search

Coincidence analysis against 154 GRBs reported by GCN, SWIFT, Fermi, MAXI, IPN, SuperAGILE, INTEGRAL.

Projecting to Advanced LIGO/Virgo sensitivity

arXiv:1205.2216

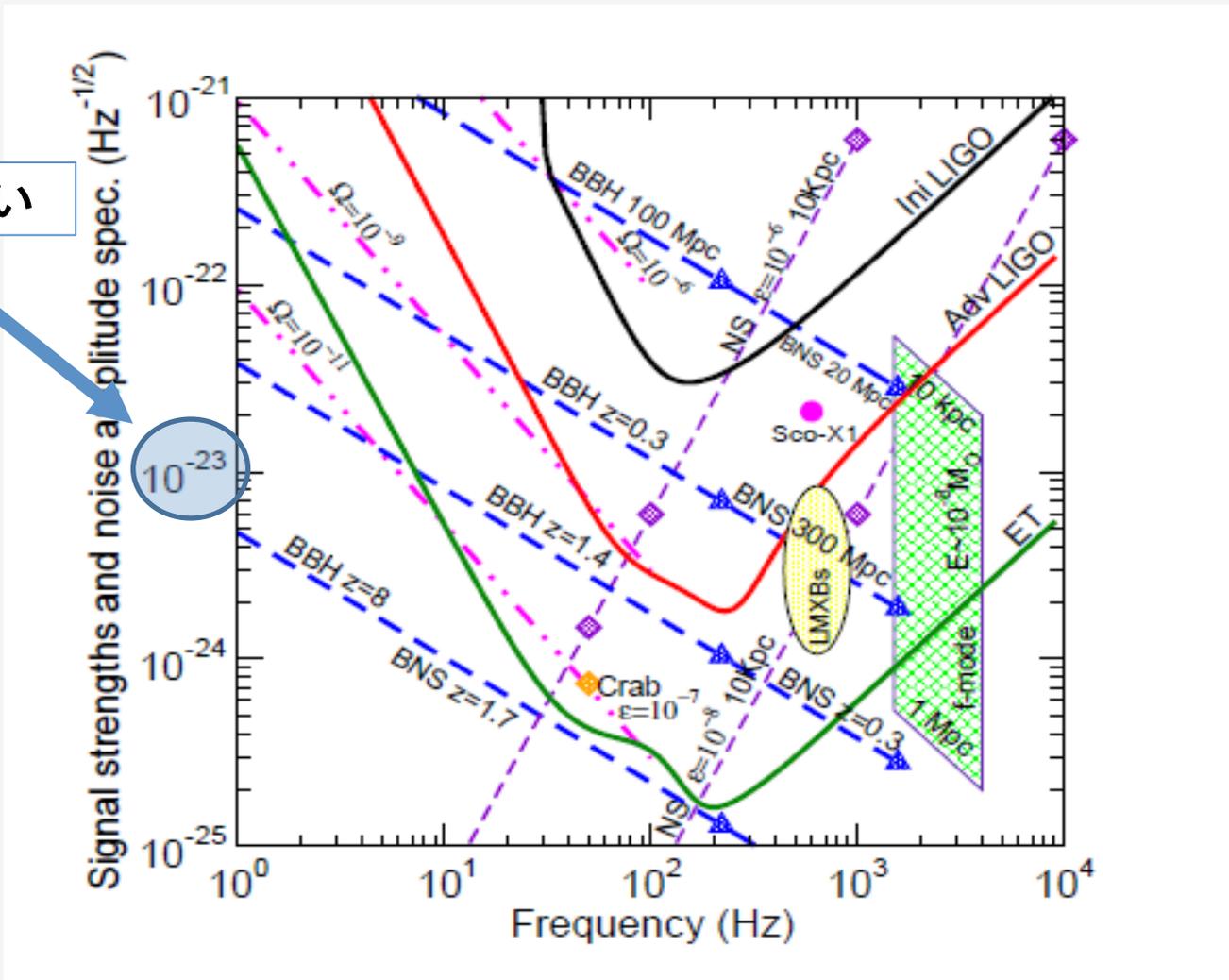


なぜデータ解析？

なぜデータ解析？

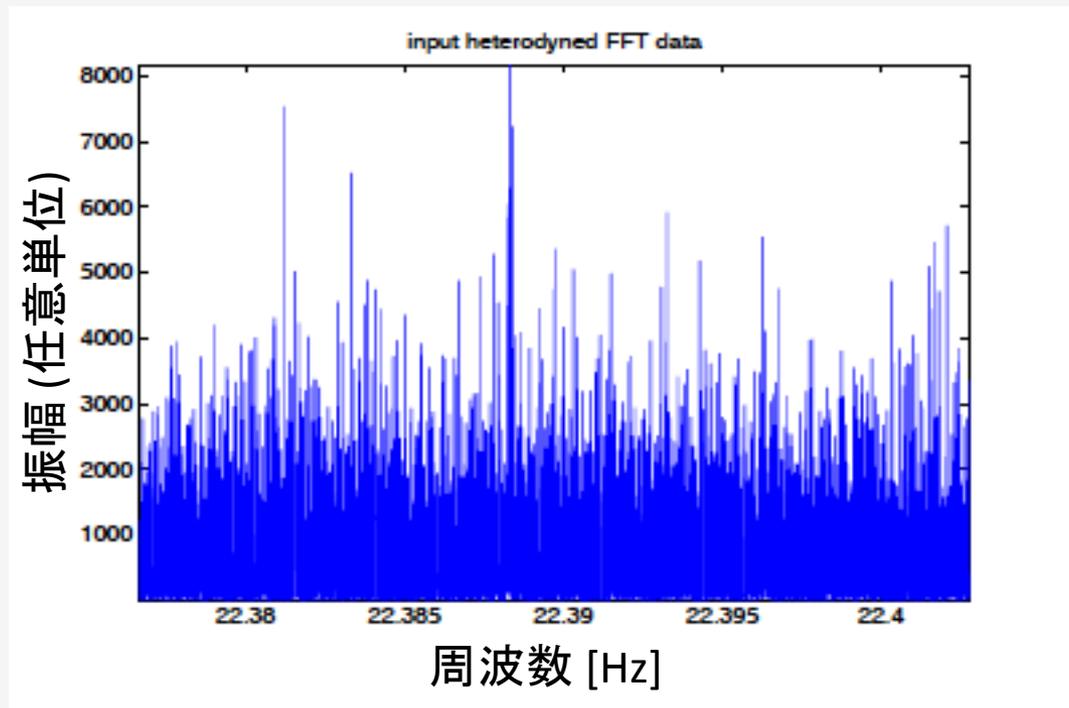
地上検出器と期待される波源

とても小さい



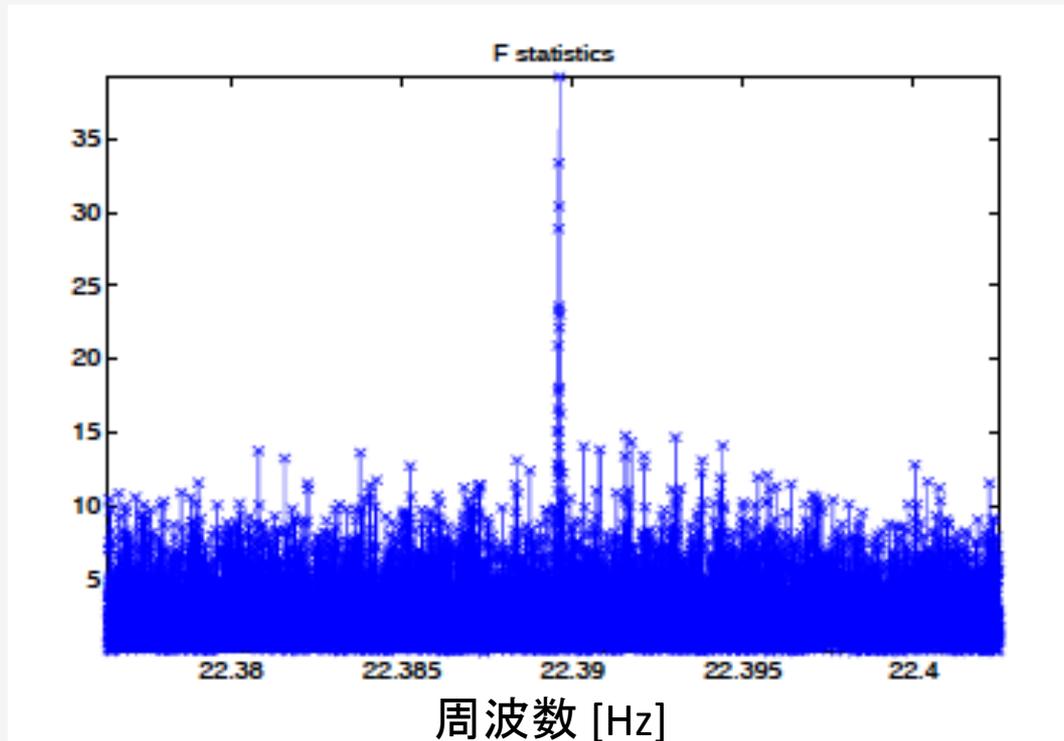
なぜデータ解析？

- $X(t) = n(t) + h(t)$
 - $h(t)$ は $n(t)$ に比べてとても小さい。



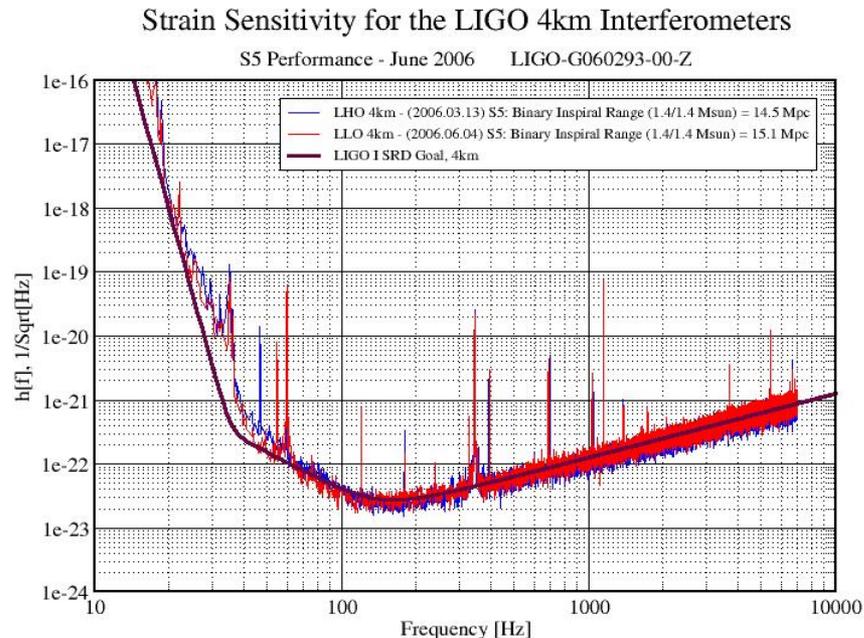
なぜデータ解析？

- $X(t) = n(t) + h(t)$
 - $h(t)$ は $n(t)$ に比べてとても小さいと期待される。
 - 「うまくやれば」信号が見えてくる。



なぜデータ解析？

- $X(t) = n(t) + h(t)$
 - 信号みたいなノイズはいっぱいある。
 - 信号だというのはどれくらい「**確からしい**」のだろうか？
 - (**信号とノイズを区別**する方法はないのだろうか？)



なぜデータ解析？

- 最初に信号を「見る」人
- 重力波を使って何かを知りたいければ、データ解析をする必要がある。
 - 星・ブラックホールの質量、スピン他の物理量
 - 重力波源の空間・時間分布
 - 重力波源のパラメーター空間分布
 - 様々な現象の相補的観測
 - GRB、超新星爆発、パルサーグリッチ、パルサー歳差運動、
 - ブラックホールの存在の検証
 - 一般相対論の検証
 - 伝搬速度(重力子の質量)
 - 偏極
 - ブラックホールのKerr-ness
 - あったらしいな
 - Cosmic (Super-)String ...

(重力波)データ解析

- $X(t) = n(t) + h(t)$
 - ノイズに埋もれた信号を効率よく取り出す。
 - 信号なのかノイズなのか、統計学を使って解析する。
 - 爆発的現象は早く検出して、早くみんなに知らせたい。
 - ニュートリノ・電磁波天文学の人にフォローアップ観測をしてもらう。
 - 新しい何かを見る。

Force Ratio K:V:L = 1:5:25

KAGRA

Tagoshi, Kanda, Oohara
Itoh, Hayama,
Takahashi
Narikawa, Yokozawa,
Ueno,

今が参入のチャンス

LSC

B. Abbott,¹⁵ R. Abbott,¹⁵ R. Adhikari,¹⁵ J. Agresti,¹⁵ P. Ajith,² B. Allen,^{2,54} R. Amin,¹⁹ S. B. Anderson,¹⁵ W. G. Anderson,⁵⁴ M. Arain,⁴¹ M. Araya,¹⁵ H. Armandula,¹⁵ M. Ashley,⁴ S. Aston,⁴⁰ P. Aufmuth,³⁸ C. Aulbert,¹ S. Babak,¹ S. Ballmer,¹⁵ H. Bantilan,⁹ B. C. Barish,¹⁵ C. Barker,¹⁶ D. Barker,¹⁶ B. Barr,⁴² P. Barriga,⁵³ M. A. Barton,⁴² K. Bayer,¹⁸ K. Belczynski,²⁶ S. J. Berukoff,¹ J. Betzwieser,¹⁸ P. T. Beyersdorff,²⁹ B. Bhawal,¹⁵ I. A. Bilenko,²³ G. Billingsley,¹⁵ R. Biswas,⁵⁴ E. Black,¹⁵ K. Blackburn,¹⁵ L. Blackburn,¹⁸ P. Blair,⁵³ B. Bland,¹⁶ J. Bogenstahl,⁴² L. Bogue,¹⁷ R. Bork,¹⁵ V. Boschi,¹⁵ S. Bose,⁵⁶ P. R. Brady,⁵⁴ V. B. Braginsky,¹⁵ M. Brau,⁴⁵ M. Brinkmann,² A. Brooks,³⁹ D. A. Brown,^{15,7} A. Bullington,³² A. Bunkowski,² A. Buonanno,⁴³ O. Busch,¹⁵ D. Busby,¹⁵ W. E. Butler,⁴⁶ R. L. Byer,³² L. Cadonati,¹⁸ G. Cagnoli,⁴² J. B. Camp,²⁴ J. Cannizzo,²⁴ J. Caron,¹⁵ J. Casper,¹⁵ D. Catterall,¹⁵ J. Cavalieri,¹⁵ J. Chaffin,¹⁵ J. Chaffin,¹⁵ M. M. Casey,⁴² G. Castaldi,⁴⁸ C. Cepeda,¹⁵ J. Chelkowski,² Y. Chen,¹ F. Chiadini,⁴⁷ D. Chin,⁴⁴ E. Chin,⁵³ J. Chiriac,¹⁵ S. Chua,¹⁵ J. Christensen,¹⁵ J. A. Clark,⁴² P. Cochrane,² T. Cokelaer,⁸ C. N. Colacino,⁴⁰ R. Coldwell,⁴¹ M. Coles,¹⁷ R. Concha,¹⁵ J. Conti,¹⁸ D. Coward,⁵³ D. Coyne,¹⁵ J. D. E. Creighton,⁵⁴ T. D. Creighton,¹⁵ R. P. Croce,⁴ J. C. Cui,¹⁵ M. I. Cruise,⁴⁰ P. Csatorday,¹⁸ A. Cumming,⁴² C. Cutler,⁷ J. Dalrymple,³³ E. D'Ambrósio,¹⁵ S. D'Antonio,¹⁵ J. Davies,⁸ E. Daw,⁴⁹ D. DeBra,³² J. Degallaix,⁵³ M. Degree,³² T. Delker,⁴¹ T. Demme,⁴ J. Dent,¹⁵ P. DeSalvo,¹⁵ S. Dhurandhar,¹⁴ M. Díaz,³⁵ J. Dickson,⁴ A. Di Credico,³³ G. Di Domenico,¹⁵ J. Dwyer,¹¹ P. F. Dwyer,¹⁵ M. M. Fejer,³² T. Fricke,¹⁵ J. A. Giaime,¹⁵ A. Granado,¹⁵ M. C. Gronke,¹⁵ B. Hage,⁴⁰ D. Hammer,⁴⁰ C. Hanna,¹⁷ J. Hanson,¹⁷ J. Harms,² G. Harry,¹⁸ E. Harstad,⁴⁵ T. Heinzel,² G. Heinzel,² I. S. Heng,⁴² A. Heptonstall,⁴² M. Heurs,² M. Hewitson,² S. Hild,³⁸ E. Hirose,³³ J. Hough,⁴² E. Howell,⁵³ D. Hoyland,⁴⁰ S. H. Huttner,⁴² D. Ingram,¹⁶ E. Innerhofer,¹⁸ M. Ito,⁴⁵ S. Iyoda,¹⁵ D. Jackrel,³² O. Jennrich,⁴² B. Johnson,¹⁶ W. W. Johnson,¹⁹ V. R. Johnson,³⁵ D. I. Jones,⁵⁰ R. Jones,⁴² L. Ju,⁵³ P. Kalmus,¹¹ V. Kalogera,²⁶ D. Kasprzyk,⁴⁰ E. Katsavrounidis,¹⁸ K. Kawabe,¹⁶ T. Kawamura,²⁵ F. Kawazoe,²⁵ W. Kells,¹⁵ D. G. Keppel,¹⁵ F. Ya. Khalili,²³ C. J. Killow,⁴² C. Kim,²⁶ P. King,¹⁵ S. Klimenko,⁴¹ K. Kokeyama,²⁵ V. Kondrashov,¹⁵ R. K. Kopparapu,¹⁹ D. Kozak,¹⁵ B. Krishnan,¹ P. Kwee,³⁸ K. Lam,⁴ M. Landry,¹⁶ B. Lantz,³² A. Lazzarini,¹⁵ B. Lee,⁵³ M. Lei,¹⁵ J. Leiner,⁵⁶ V. Leonhardt,²⁵ I. Leonor,⁴⁵ J. Libbrecht,¹⁵ A. Libson,⁹ P. Lindquist,¹⁵ N. A. Lockerbie,⁵¹ J. Logan,¹⁵ M. Longo,⁴⁷ M. Lormand,¹⁷ M. Lubinski,¹⁶ H. Lück,^{38,2} B. Machenschalk,¹ M. MacInnis,¹⁸ M. Mageswaran,¹⁵ K. Mailand,¹⁵ M. Malec,³⁸ V. Mandic,¹⁵ S. Marano,⁴⁷ S. Márka,¹¹ J. Markowitz,¹⁸ E. Maros,¹⁵ I. Martin,⁴² J. N. Marx,¹⁵ K. Mason,¹⁸ L. Matone,¹¹ V. Matta,¹¹ N. Mavalvala,¹⁸ R. McCarthy,¹⁶ D. E. McClelland,⁴ S. C. McGuire,³¹ M. McHugh,²¹ K. McKenzie,⁴ J. W. C. McNabb,³⁴ S. McWilliams,²⁴ T. Meier,³⁸ A. Melissinos,⁴⁶ G. Mendell,¹⁶ R. A. Mercer,⁴¹ S. Meshkov,¹⁵ E. Messaritaki,¹⁵ C. J. Messenger,⁴² D. Meyers,¹⁵ E. Mikhailov,¹⁸ S. Mitra,¹⁴ V. P. Mitrofanov,²³ G. Mitselmakher,⁴¹ R. Mittleman,¹⁸ O. Miyakawa,¹⁵ S. Mohanty,³⁵ G. Moreno,¹⁶ K. Mossavi,² C. MowLowry,⁴ A. Moylan,⁴ D. Mudge,³⁹ G. Mueller,⁴¹ S. Mukherjee,³⁵ H. Müller-Eberhardt,² J. Munch,³⁹ P. Murray,⁴² E. Myers,¹⁶ J. Myers,¹⁶ S. Nagano,² T. Nash,¹⁵ G. Newton,⁴² A. Nishizawa,²⁵ F. Nocera,¹⁵ K. Numata,²⁴ P. Nutzman,²⁶ B. O'Reilly,¹⁷ R. O'Shaughnessy,²⁶ D. J. Ottaway,¹⁸ H. Overmier,¹⁷ B. J. Owen,³⁴ Y. Pan,⁴³ M. A. Papa,^{1,54} V. Parameshwaraiah,¹⁶ C. Parameswariyah,¹⁷ P. Patel,¹⁵ M. Pedraza,¹⁵ S. Penn,¹³ V. Pierro,⁴⁸ I. M. Pinto,⁴⁸ M. Pitkin,⁴² H. Pletsch,² M. V. Plissi,⁴² F. Postiglione,⁴⁷ R. Prix,¹ V. Quetschke,⁴¹ F. Raab,¹⁶ D. Rabeling,⁴ H. Radkins,¹⁶ R. Rahkola,⁴⁵ N. Rainer,² M. Rakhmanov,³⁴ M. Ramsunder,³⁴ K. Rawlins,¹⁸ S. Ray-Majumder,⁵⁴ V. Re,⁴⁰ T. Regimbau,⁸ H. Rehbein,² S. Reid,⁴² D. H. Reitze,⁴¹ L. Ribichini,² S. Richman,¹⁸ R. Riesen,¹⁷ K. Riles,⁴⁴ B. Rivera,¹⁶ N. A. Robertson,^{15,42} C. Robinson,⁸ E. L. Robison,⁴⁰ S. Roddy,¹⁷ A. Rodriguez,¹⁹ A. M. Rogan,⁵⁶ J. Rollins,¹¹ J. D. Romano,⁸ J. Romie,¹⁷ H. Rong,⁴¹ R. Route,³² S. Rowan,⁴² A. Rüdiger,² L. Ruet,¹⁸ P. Russell,¹⁵ K. Ryan,¹⁶ S. Sakata,²⁵ M. Samidi,¹⁵ L. Sancho de la Jordana,³⁷ V. Sandberg,¹⁶ G. H. Sanders,¹⁵ V. Sannibale,¹⁵ S. Saraf,²⁷ P. Sarin,¹⁸ B. Sathyaprakash,⁸ S. Sato,²⁵ P. R. Saulson,³³ R. Savage,¹⁶ P. Savov,⁷ A. Sazonov,⁴¹ S. Schediwy,⁵³ R. Schilling,² R. Schnabel,² R. Schofield,⁴⁵ B. F. Schutz,^{1,8} P. Schwinberg,¹⁶ S. M. Scott,⁴ A. C. Searle,⁴ B. Sears,¹⁵ F. Seifert,² D. Sellers,¹⁷ A. S. Sengupta,⁸ P. Shawhan,⁴³ D. H. Shoemaker,¹⁸ A. Sibley,¹⁷ J. A. Sidles,⁵² X. Siemens,^{15,7} D. Sigg,¹⁶ S. Sinha,³² A. M. Sintes,^{37,1} B. J. J. Slagmolen,⁴ J. Slutsky,¹⁹ J. R. Smith,² M. R. Smith,¹⁵ K. Somiya,^{2,1} K. A. Strain,⁴²

Data Analysis School

主催: RESCEU, KAGRA ほか

講義: データ解析チーム+招待講師

1st KAGRA data analysis school

- Sept. 3-5, 2012 at RESCEU, U. of Tokyo
- Number of participants: **about 70**
- Basics of matched filtering (Tagoshi, Takahashi)
- Overview (Kanda), Statistics (Itoh)

2nd KAGRA data analysis school

- Feb. 20-22, 2013 at NAOJ, Mitaka, Tokyo
- Number of participants: **about 60**
- Gravitational wave burst search (Hayama)
- Spectral analysis (Mio), Interferometer (Aso), SN (Kotake), Beam pattern function (Kanda)
- Special thanks to Nakamura (NAOJ)

3rd KAGRA data analysis school

- Sep. 28-29, 2013 at RESCEU, U. of Tokyo
- Number of participants: **about 73**
- Continuous wave search (Itoh)
- Pulsar timing (van Haasteren, JPL), Stellar Oscillation (Kojima)



Data Analysis

主催: RESCEU, KAGRA
講義: データ解析チ

1st KAGRA data analysis school

- Sept. 3-5, 2012 at RESCEU
- Number of participants: about 73
- Basics of matched filter (Itoh)
- Overview (Kanda), Spectral analysis (Miyaji)

2nd KAGRA data analysis school

- Feb. 20-22, 2013 at RESCEU
- Number of participants: about 73
- Gravitational wave detection (Aso)
- Spectral analysis (Miyaji)
- Special thanks to Nishida

重力波の第一発見者になろう！

KAGRA重力波データ解析スクール2014

東京大学本郷キャンパス理学部
2014年4月18日(金) - 19日(土)

<http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/workshops/jgwdas201404/>

目的: 重力波天文学への招待
1915年に発表されたアインシュタインの一般相対論は、時空のさざなみ重力波の存在を予言しました。百年後の現在、日本の重力波検出器KAGRAを含む世界各国の重力波検出器が重力波を検出し、新しい天文学「重力波天文学」を創成しようと協力・競争して研究をすすめています。1960年代に始まった直接検出への努力がついに実を結ぼうとしています。本スクールでは、重力波の基本的性質から、重力波天文学、さらにはKAGRAの2018年本格稼働を見据え、データ解析手法までを学びます。重力波データ解析に取り組み、重力波信号を最初に目にするチャンスを手にしませんか？

講師・内容:
 横山 順一 (東京大学)・一般相対論
 川村 静児 (東京大学宇宙線研究所)・重力波検出器
 柴田 大 (京都大学基礎物理学研究所)・数値相対論
 その他、KAGRA データ解析チームによる講義があります。

対象: 主に大学院進学予定の学部4年生
定員: 20名程度
申込: 上記URLから。
申込締切: 4月2日(大学宿舍宿泊希望の場合)、4月10日(それ以外)
参加費無料・遠隔地より参加の方には旅費の補助が可能です。

茂住地区
3km
XMASS
Kamland
Super Kamiokande
CLIO
SG
KAGRA
海拔358m
奥山

主催: KAGRA データ解析サブシステム
 KAGRA Collaboration
 東京大学 ビッグバン宇宙国際研究センター・安東研究室
 国立天文台重力波プロジェクト推進室
 京都大学重力波物理学研究センター
 重力波物理学研究コンソーシアム

データ解析チーム: 大阪大学 大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻
 大阪市立大学 大学院理学研究科 数物系専攻
 新潟大学 大学院自然科学研究科 数物理質科学専攻
 長岡技術科学大学 大学院工学研究科 経営情報系
 東京大学 大学院理学系研究科付属 ビッグバン宇宙国際研究センター

問い合わせ先: toiawase@resceu.s.u-tokyo.ac.jp

Image credit: KAGRA, ICRR, Univ. of Tokyo

ysis school
 RESCEU, U. of Tokyo
 ants: about 73
 earch (Itoh)
 Haasteren, JPL), Stellar



Part2 連続波

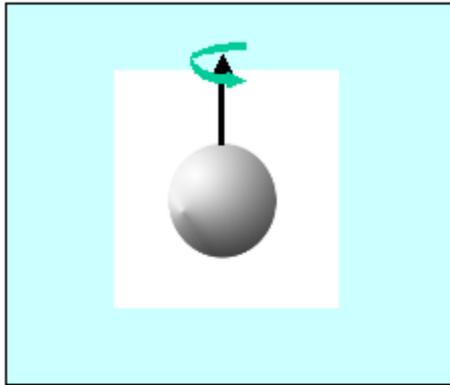
目次

- 解析手法から見た重力波源の分類
- 重力波(を放出する)パルサーとはどんなものか？
 - 物理
 - 探索結果の例
- 重力波パルサー探索の方法(F-statistic, coherent search)
 - 考え方
 - 統計？
- 計算量の問題
 - 計算量を減らす工夫と計算能力を獲得する工夫

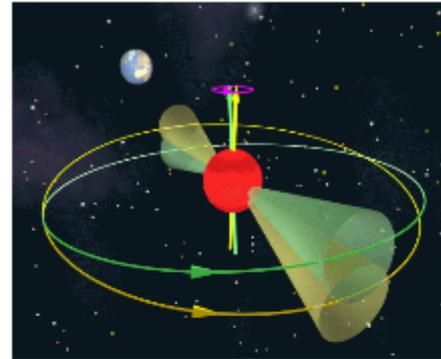
解析手法から見た地上検出器の重力波源の分類

	Continuous	Binary/Quasi Normal Mode	Stochastic	Burst
天体	Pulsars, oscillating compact stars.	NSs or BHs merger, QNM of newborn BHs.	Unknown Background?	GRBs, SNe, Novae, unknown, etc.
テンプレートの有無	有(基本的に Sinusoid)	有(3.5PN or 現象論的波形)/BH 摂動論	無(複数検出器の相関解析)	(数値相対論やサインガウシアンなど)
積分時間	週～年	秒～分	週～年	秒～分
留意すべき特徴	地球の公転・自転による重力波信号の変調。	一つのイベントをなんども観測できないので、フォローアップ重要。	相関解析なので1台では無理。地球公転・自転による変調。	一つのイベントをなんども観測できないので、フォローアップ重要。
解析上のテーマ	広天域・広周波数帯域で探索すると計算量大。	ν γ 天文学との連携のための速報システム開発。		ν γ 天文学との連携のための速報システム開発。
ノイズ	スペクトルにおける線ノイズ。	バーストノイズ		バーストノイズ。

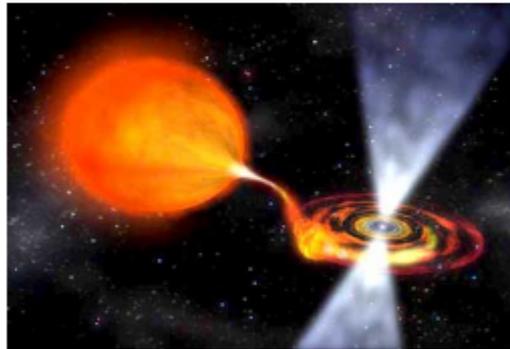
連続重力波を出す天体とはどんなものか(物理)



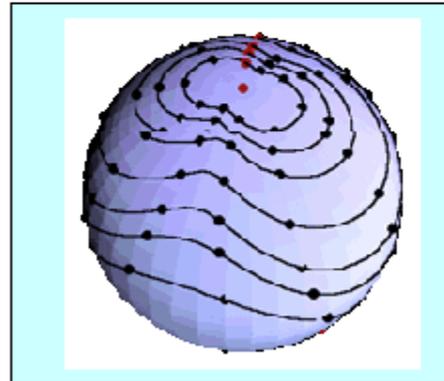
Mountain on a star



Wobbling star



Accreting star



Oscillating star

連続重力波を出す天体とはどんなものか(物理)

- 軸対称定常な系からは重力波でない。
- 高速自転する、表面がでこぼこしたコンパクト星(パルサー、高速自転するクオーク星 etc.)

- でこぼこの程度を表すパラメータ

$$\epsilon = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \quad \text{山の高さ} \sim 1\text{mm} (\epsilon/10^{-7}) \text{ (中性子星の半径/10km)}$$

- 重力波パルサーが放射する重力波の振幅

$$\begin{aligned} h_0 &= \frac{16\pi^2 G}{c^4} \frac{\epsilon I_{zz} f^2}{r} \\ &= 4.2 \times 10^{-27} \frac{\epsilon}{10^{-7}} \frac{I_{zz}}{10^{45} \text{g/cm}^2} \left(\frac{f_0}{100\text{Hz}} \right)^2 \left(\frac{r}{1\text{kpc}} \right)^{-1} \end{aligned}$$

重力波源としてのパルサー

- 半永続的に存在する。
 - 後で確認が可能。
 - 信号対雑音比が $\sqrt{T_{\text{obs}}}$ で増加。
 - 原理的には1つの検出器で検出可能。
 - 時間をかければ検出できる!
- 「そこ」にある。!
 - ATNF パルサーカタログには、周波数、周波数時間微分、距離の知られている1890のパルサーがリストされている。(2013/9/4時点)
 - いまでもどんどん見つかったている。
 - さっき(2014/4/17 0:08)見たら、1962個に増えてた。

何が分かるの？

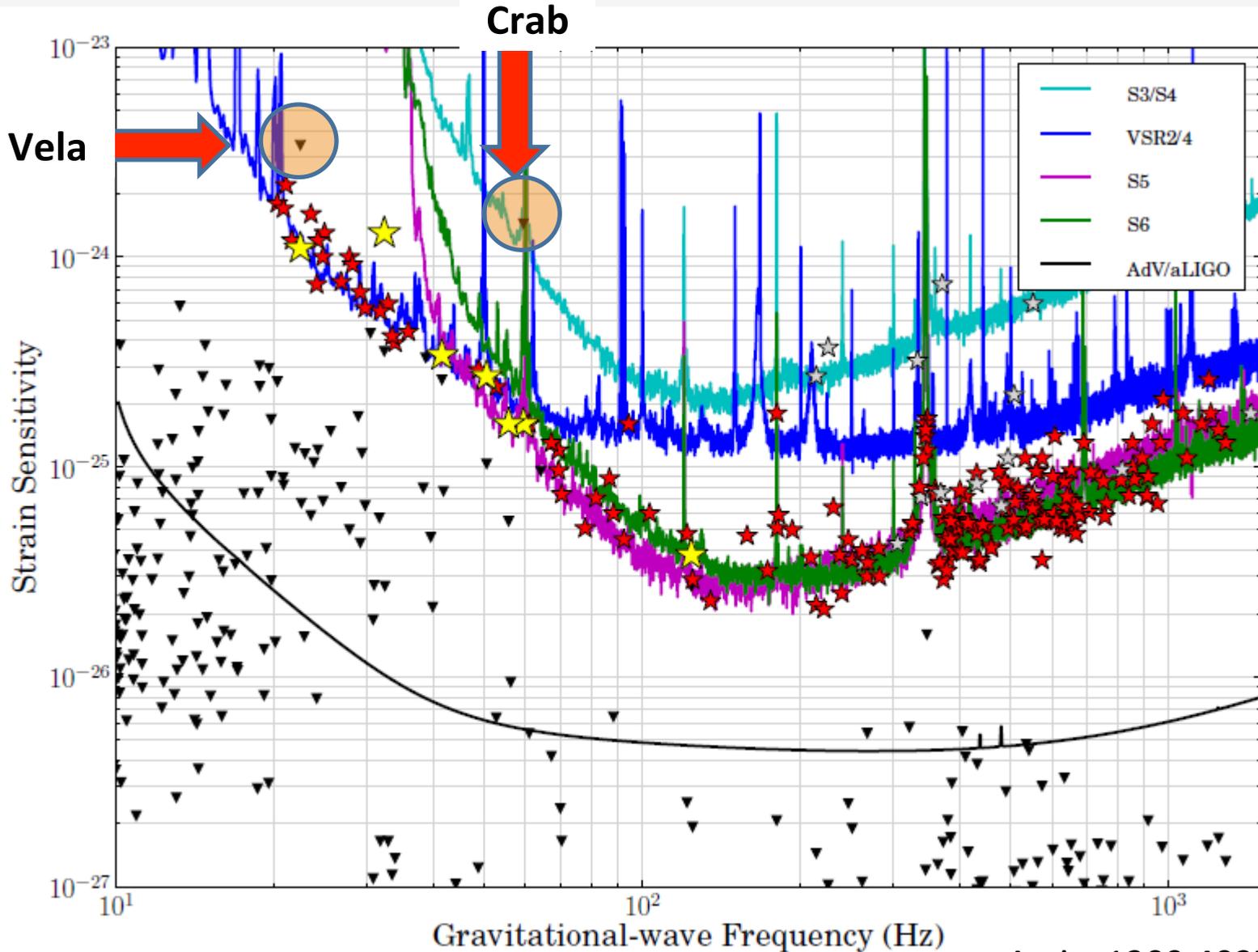
- 重力波がホントに地球まで伝搬してること。
- 距離が分かっていたら、外殻の固さ。
 - Quark star, hybrid star, large toroidal B-field
- パルサーが放出しているエネルギーの配分
 - 物質の加速 xx割、電磁波xx割、重力波xx割....
- 電磁波で見つかってない「だーく」なパルサー
 - 電磁波ビームがこっち向いてないやつ。もしくは、電磁波ビームを出してないやつがいるかも。
- 歳差運動 (たぶん小さいかも)
- 低質量X線連星からのr-mode 重力波検出で、Bildstenシナリオの検証

解析結果の例

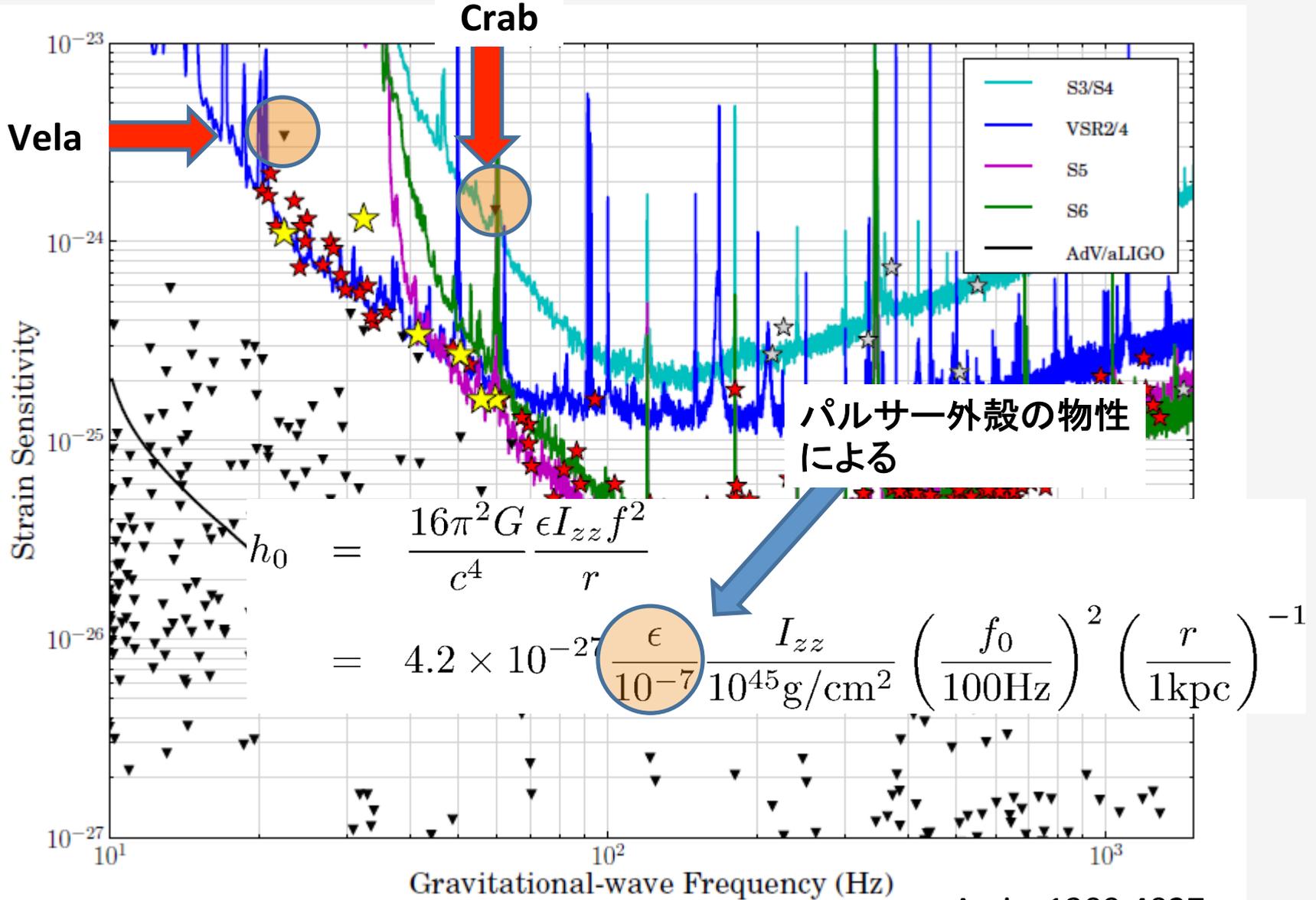
重力波パルサーとはどんなものか (LSC探索結果例)

- LIGO S5 2005 Nov. 4- 2007 Oct. 1
 - 525 days (H1, duty cycle 78%), 532 (H2, 79%), 437 (L1, 66%) worth data.
- Targeted search: 116 known millisecond/young pulsars.
 - radio/X-ray timing data (Jodrell Bank Observatory, NRAO 100m Green Bank Telescope, Parkes radio telescope of the Australia Telescope National Facility, and Rossi X-ray Timing Explorer.)
 - Coherent integration, time-domain Bayesian analysis.
- Wide band all-sky search:
 - S5 2years data, Powerflux search (Incoherent search), 50-800 Hz band. Setting upper limits on every 0.25 Hz band.
 - Early S5 data, 30 hours Fstatistic (Coherent) search + 840 hours incoherent post-processing, 50-1500 Hz band, BOINC-Einstein@Home computing facility.

連続波（既知の単独パルサーからの重力波）探索例



連続波 (既知の単独パルサーからの重力波) 探索例



具体的にはどうやって解析してるの？

マッチドフィルター

Matched filtering:

Prepare template family that depends on parameters λ (mass, spin, polarization, inclination ...)

For detector output $x(f)$, find a waveform template $h(f, \lambda)$ that maximizes the SNR ρ . The parameters that maximize ρ , $\lambda \downarrow \max$, is the “measured” parameters of the system.

$$\rho^2 = 4 \operatorname{Re} \int df \frac{x(f) h_{theory}^*(f, \vec{\lambda})}{S_h(f)}$$

- 信号対雑音比を最大化するという意味で最適な線形フィルター。
- ノイズ分布がガウシアンときには、最尤推定法による検出法と一致するという意味で、最適な方法の1つ。

マッチドフィルターを使えないとき

- 計算資源が足りないため使えない場合：
 - 未知の高速自転コンパクト星の探索など。
 - Incoherent 探索をおこなう。
- 波形予測が難しいとき。
 - 超新星爆発、GRBなど。
 - 現象論的波形モデルを使う。
 - Excess powerなどを使う。
 - 多くの検出器との同時検出を狙う。
 - $\nu\gamma$ 望遠鏡との同時検出を狙う。
 - 数値計算の人にがんばってもらう。

連続波探索で使われるマッチドフィルター、 F-Statistic

(Jaranowski, Krolak & Schutz 1998)

具体的には、
$$\mathcal{F} = \frac{T_0}{S_h(nf_0)} \frac{B|F_a|^2 + A|F_b|^2 - 2CR(F_a F_b^*)}{AB - C^2}$$

ただし(wobble n=1, r-mode 4/3, triaxial n=2 etc.)、

$$F_a = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} dt x(t) a(t) \exp[-in\Phi_s(t)] \exp[-i2\pi n f_0 \{t + \Phi_m(t)\}]$$

$$F_b = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} dt x(t) b(t) \exp[-in\Phi_s(t)] \exp[-i2\pi n f_0 \{t + \Phi_m(t)\}]$$

ここで、重力波の位相を以下のように書いている。

$$\Phi(t) = 2\pi f_0 [t + \Phi_m(t; \alpha, \delta)] + \overset{(k)}{\Phi_s(t; f_0, \alpha, \delta)}$$

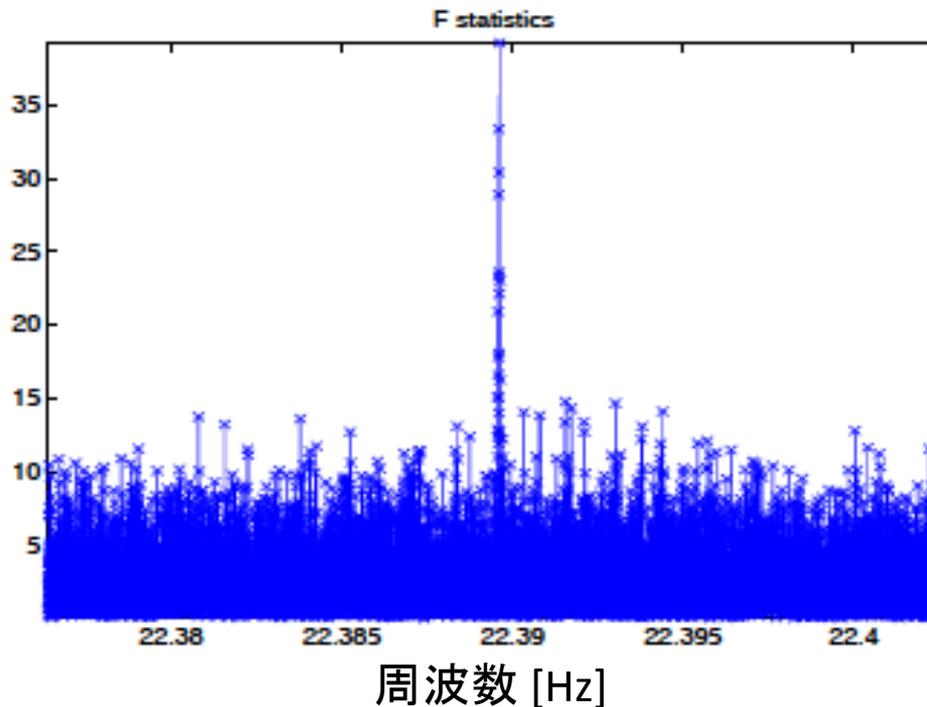
A, B, Cは $A=(a||a)$, $B=(b||b)$, $C=(a||b)$
で内積は

$$(x||y) := \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t)y(t)dt.$$

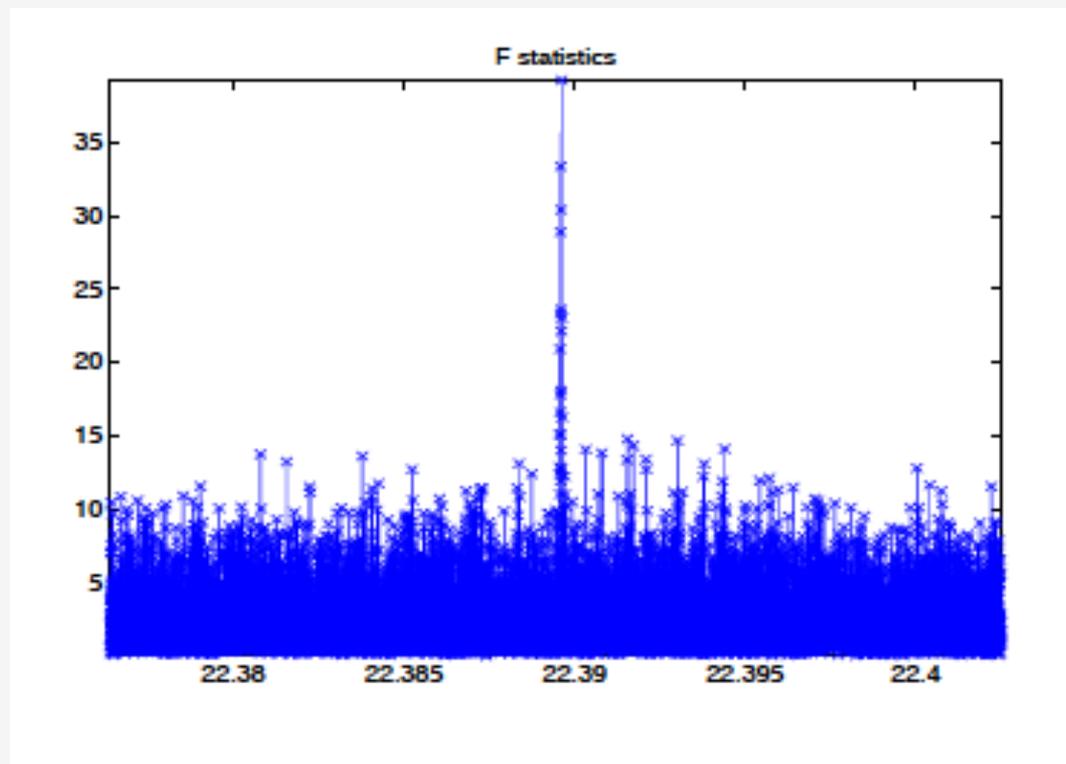
なぜデータ解析？

- $X(t) = n(t) + h(t)$
 - $h(t)$ は $n(t)$ に比べてとても小さいと期待される。
 - 「うまくやれば」信号が見えてくる

最初に見せたこれ↓、F-Statisticです。



↓が信号だというのはどれくらい
「確からしい」のだろうか？
(安心のための統計学)



Detection statisticとしてのF-statistic

- 重力波信号のPhase parameter ($f_0, f_1, \dots, \alpha, \delta$)が(近似的に)分かっている、ノイズがガウス分布にしたがうとする。
- 重力波信号が存在しないときには、(ある n について、たとえばtri-axial pulsar $n=2$ について)、 $2F$ は自由度4の χ^2 分布に従う。

$$\chi_4^2(\mathcal{F})d\mathcal{F} = \mathcal{F}e^{\mathcal{F}}d\mathcal{F}$$

- 重力波信号が存在するときには、(ある n について)、 $2F$ は自由度4、非中心パラメータ d^2 の非中心 χ^2 分布に従う。

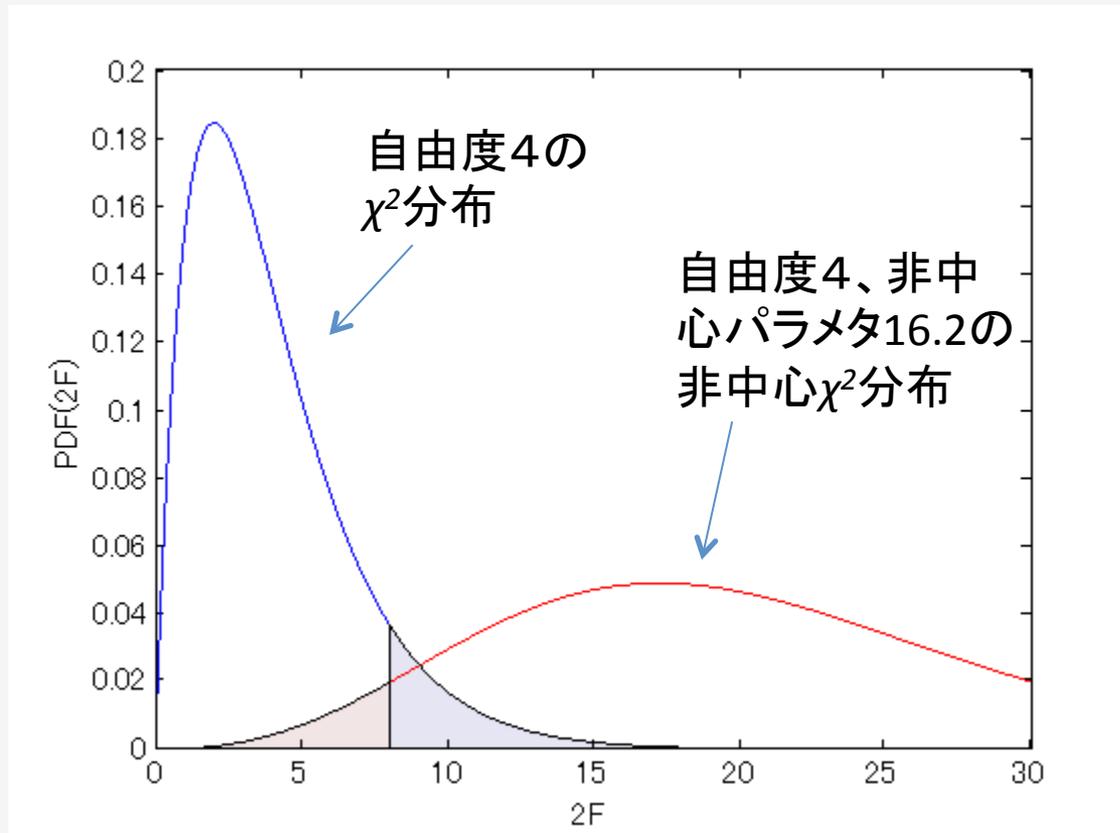
$$NC\chi_4^2(\mathcal{F}, d^2)d\mathcal{F} = \left(\frac{2\mathcal{F}}{d^2}\right)^{1/2} e^{-(\mathcal{F} + \frac{d^2}{2})} I_1(\sqrt{2\mathcal{F}d})d\mathcal{F}$$

ただし d^2 は、optimal signal to noise ratio

$$d^2 = (h|h) \simeq \frac{2}{S_h(nf_0)} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} [h_n(t)]^2 dt \propto \frac{T_0 h_0^2}{S_h}$$

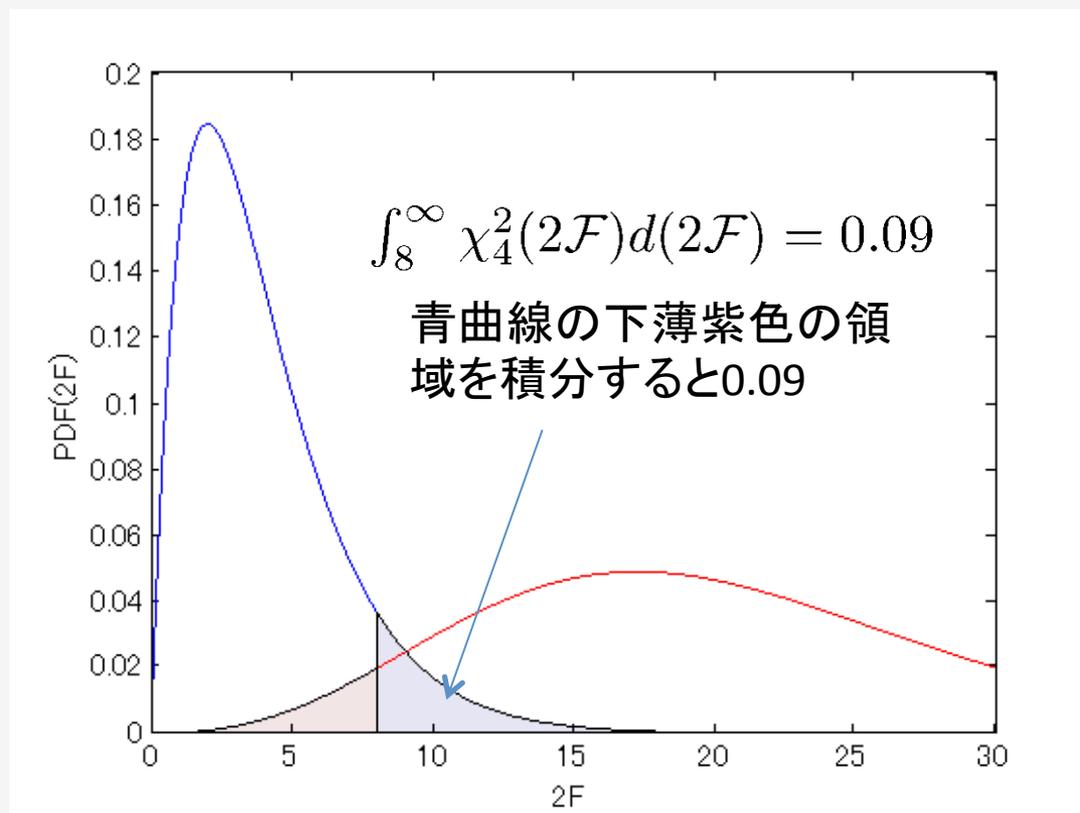
χ^2 分布と非中心 χ^2 分布の性質

- 自由度 n の χ^2 分布: 平均 $\langle 2F \rangle = n$, 分散 $\langle (2F - \langle 2F \rangle)^2 \rangle = n$
- 自由度 n 、非中心パラメータ d^2 の非中心 χ^2 分布:
平均 $\langle 2F \rangle = n + d^2$, 分散 $\langle (2F - \langle 2F \rangle)^2 \rangle = 2n + 4d^2$



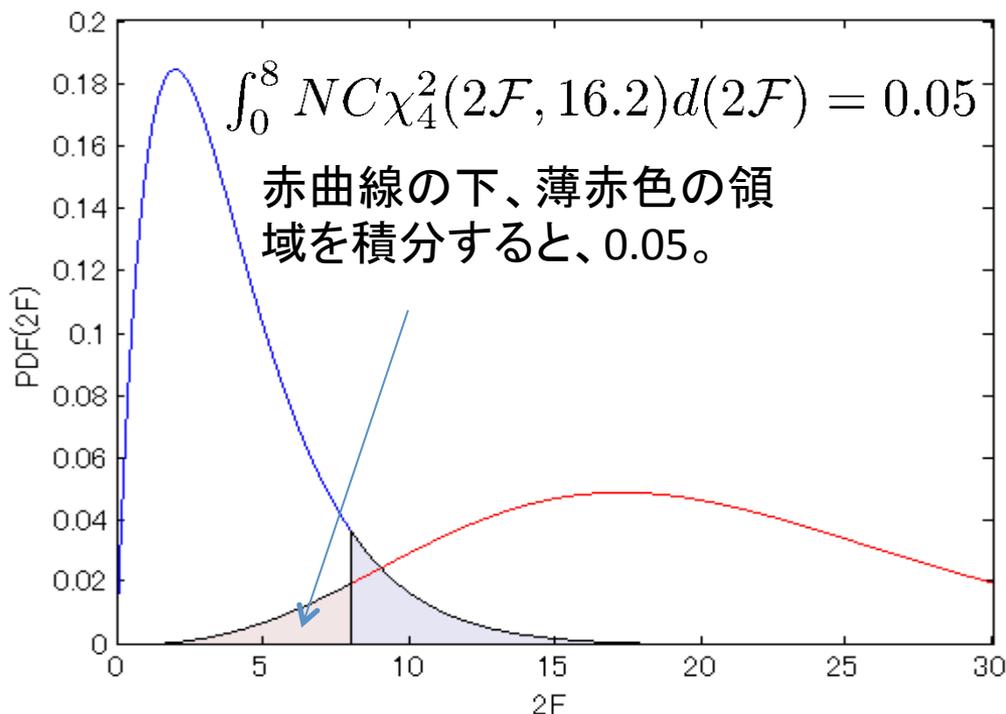
F-statisticの統計的性質がわかっていると何が嬉しいのか？： 候補イベントがどれぐらい重力波っぽいか決める。

- ある観測で $2F=8$ を得たとする。
- 重力波信号が存在しなくても、ノイズだけで $2F>8$ を与える確率は9%ある。
- 100回似たような観測をしたら、9回は重力波が存在しなくても8以上の $2F$ を得るということ。
- このイベントは確信を持って重力波由来とは言えない。



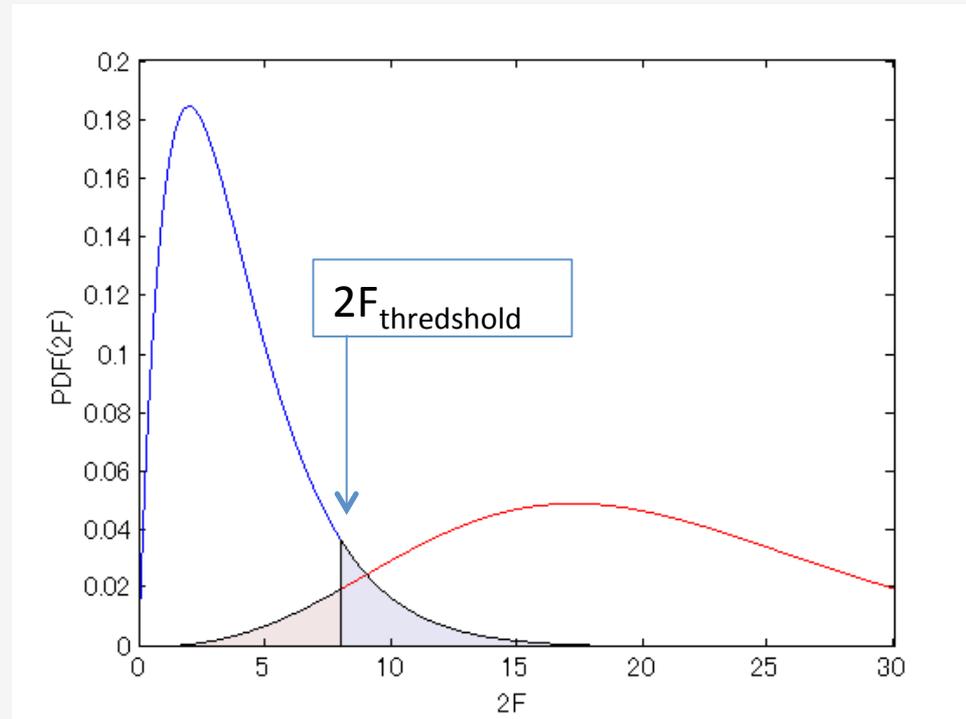
F-statisticの統計的性質がわかっていると何が嬉しいのか？： 重力波振幅の上限値を決める。

- ある観測で $2F=8$ を得たとする。
- $d^2 = 16.2$ であるような重力波信号が存在したとすると、 $2F < 8$ であるような確率は5%である。
- 重力波振幅に対する95%上限値が $h_0^{95} = \sqrt{16.2} S h / Q$ と求まる (Q は波源の方角など振幅以外のパラメータに依存する $O(1)$ の数)。
- 100回似たような観測をしたら5回は8以下の $2F$ を得るような重力波振幅が $Q h_0^{95}$ 。



F-statisticの統計的性質がわかっていると何が嬉しいのか？ :

False alarm rate と False dismissal rate



- 青が信号無しの際のDetection statistic (今は $2F$)の確率密度分布、赤が信号ありの際の確率密度分布とする。
- Detection statisticの閾値を $2F_{\text{threshold}}$ と事前に定めておくと
 - 薄紫色の面積がFalse alarm rate (FAR: ノイズを信号と誤判断してしまう確率)を与える。
 - 薄赤色の面積がFalse dismissal rate (FDR: 信号を誤って見落としてしまう確率)を与える。

細かい(けど大切な)ことはたくさん

データ解析の流れ (F-statistic coherent searchの場合)

前準備1

1. 地球の公転・自転運動について情報(ephemeris file)をあらかじめ得ておく (TEMPO2、LALなどのソフト)。
2. Known pulsar searchの場合は探索対象のパルサーの位相情報を電磁波天文学から得ておく(重力波探索開始時の周波数・その高階時間微分がいくらかを求める)。
3. Known pulsar searchでかつ探索対象パルサーが連星系をなしている場合は、連星運動のephemerisを電磁波天文学から得ておく。
4. Known pulsar searchでかつグリッチが起きていた場合、位相モデルに組み込む。

前準備2

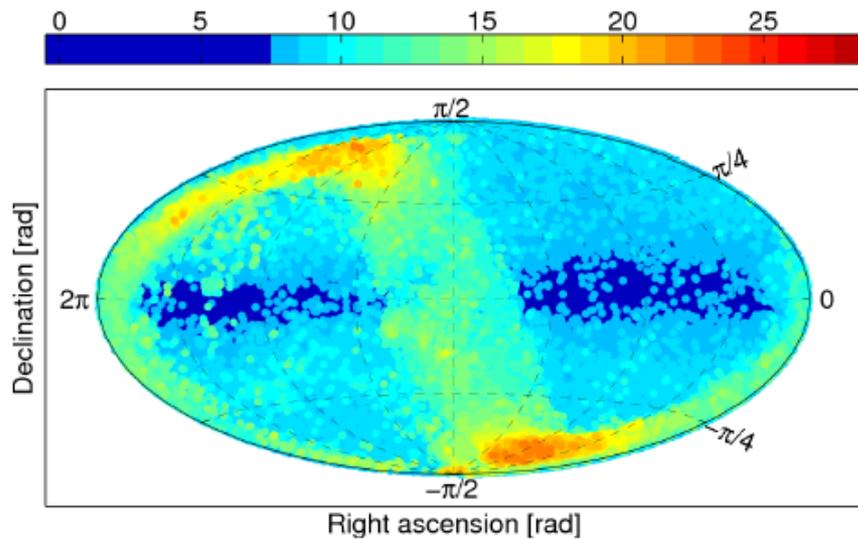
1. Low pass filter (step 2でのaliasingを防ぐ)
2. Down sample: 16kHz \rightarrow 4kHz (2kHzぐらいまで探索する。データ量低減のため)
3. 全 T_0 分のデータを長さ τ 分の $N=(T_0/\tau)$ 個のセグメントに分ける。セグメント長は、ドップラー効果による周波数シフトが1ビンを下回るように決めている。F-statistic 計算コードの都合で長いほうが良いが、だいたい $\tau=30$ 分ぐらいが限度。
4. 各セグメントごとにtime domainでフィルターをかけて、 $t=0$, $t=\tau$ でデータがゼロになるようにする(step 5で余計なノイズを生成しないように)。
5. 各セグメントをそれぞれFourier Transformする(これをSFTと呼ぶ。)

ComputeFStatistic_v2 code (LALApps/LALSuiteのF-statistic計算コード):

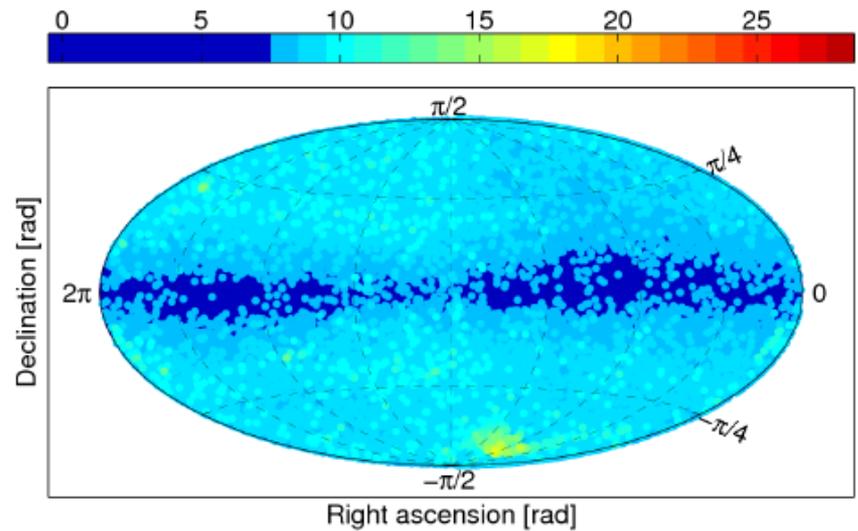
1. パラメータ探索範囲を決める。(どの天域で、どのようなモデルに従う重力波を検出するか決める。)
2. 探索するパラメータ点を決める。(パラメータ空間は離散的にしか掃けないので、信号を失わないように密に、かつ計算時間がすくなくなるように疎に掃く。)
3. N個のSFTを取り込んでF-statisticを計算する。
4. 事前に設定した閾値よりも大きいFを持つイベントを記録しておく。閾値は設定するFAR, FDRに依存する。

Veto:

1. 重力波候補イベントが地球上の現象起源のノイズ(検出器起源のノイズなど)でないことを確かめる。(例: アメリカの電源: 60Hz → 60Hzとそのハーモニクスがスペクトル線として現れる。)
2. 他の検出器との整合性(異なる検出器で得られたパラメータセットは、互いに無矛盾か?)
3. “重力波信号らしい”イベントなのか?
 - a. Chi-square テスト (Itoh et al. 2004)
 - b. Terrestrial lineなら地球自転軸を通る大円上にならぶ (E@H)
(ほとんどDoppler周波数ドリフトを受けない天域(自転では北・南極、公転では黄道の両極)があり、その方向の重力波は、もともとDoppler周波数ドリフトを受けない地球起源の線ノイズと区別をつけづらい。)



(a)

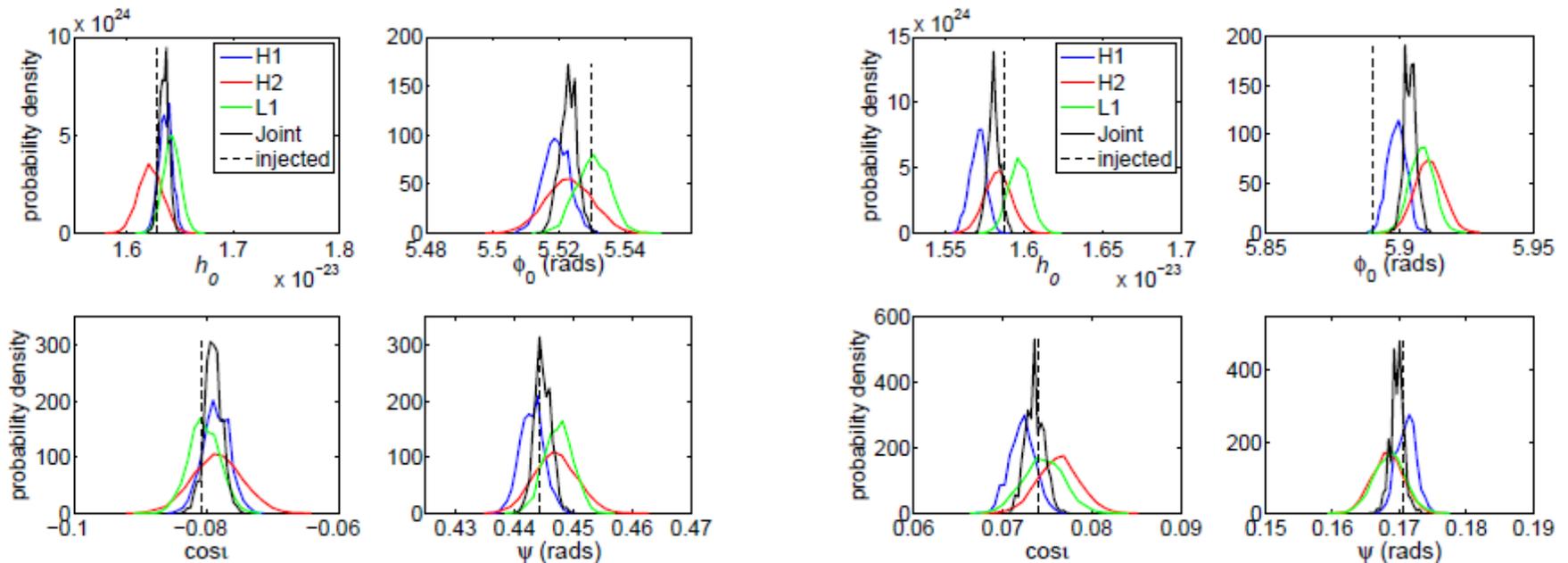


(b)

Einstein@Home on S5,
50-1500Hz all-sky search
result. (a) including
known instrumental
lines and hardware
injections. (b) without
known instrumental
lines.

重力波発見:

1. 候補イベントが”すべてのテスト”をパスしたら、検出。
2. パラメータの確率分布を与える。「(ベイズアンの場合は、)重力波振幅はこれこれの確率でこの範囲に入る。」
3. パラメータの確率分布はMCMCなどで決定。
4. イメージとしては下図の感じ。(Hardware injectionに対してtime domain Bayesian analysisでおこなったもの。LSC2010)



5. 物理について議論...

Setting upper limit:

1. 候補イベントが棄却されたら重力波振幅の上限を与える。
「この天域ではこの周波数領域には、これこれの性質を持つ重力波は、地球に到達していたとしてもxxパーセントの確率でこれ以下の振幅しか持たない。(これこれの振幅を持っている信号が到達していたとしていたら、我々はxxパーセントの確率で検出していたはずだ。)」
2. 上限を与えるためには、F-statistic(か、使用したdetection statistic)の統計的性質(=ノイズの統計的性質)を知る必要がある。
3. モンテカルロシミュレーションでノイズの統計的性質を求める。
 - 振幅の上限を与えるパラメータ領域から少しずれたパラメータ領域に、ある重力波振幅を仮定してソフトウェアインジェクションをX回おこない、 $2F_{\text{simulation}}$ を計算する。X個の $2F_{\text{simulation}}$ を得る。
 - X個の $2F_{\text{simulation}}$ のうち、xx個が実測の2Fを下回るようなoptimal signal to noise ratioを与える振幅を計算する。これがxx/Xパーセント上限値を与える。
4. ちなみにknown pulsar searchでノイズがガウスノイズの場合、1% FAR, 10%FDRを仮定すると、振幅以外のパラメータを平均したときの振幅の上限値は以下の式で与えられる。

$$\langle h_0 \rangle = 11.4 \sqrt{S_n(f_s)/T},$$

f_s は重力波周波数、 T は積分時間、 S_n は検出器ノイズパワースペクトル、数値11.4は仮定したFAR,FDRに依存する。

連続波探索の課題：計算量の問題

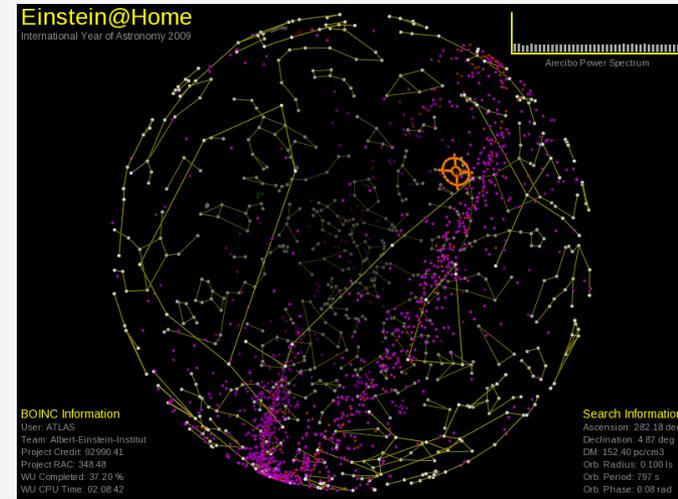
- Known pulsar search (はcoherent search (F-statisticやtime-domainでの探索で問題無い。))
- 広周波数帯域、広天域探索では計算量が多すぎるという問題が起こる。
- LMXB探索でも同様。

Einstein@Home

over 500 TFLOPS

アレシボ電波/Fermi LATデータ解析にも利用、電波・ γ 線パルサーを発見した。

Science 329 pp. 1305 (2010), ApJL 779 L11 (2013) など。



First seen on	2004-11-08 19:13:59
Category	Astrophysics
Total credit	99,317,504,316 Comprising 99,317,504,316 from the daily update + 0 since then
Recent average credit RAC	101,429,533
Recent average credit RAC (according to BOINCstats)	101,733,576
Average floating point operations per second	507,147.7 GigaFLOPS / 507.148 TeraFLOPS
Contribution to BOINC combined total credit	5.39232%
Contribution to BOINC combined total RAC	5.93926%
Users	355,719
Active users	32,010 (9.00%)
Hosts	0
Active hosts	0 (0.00%)
Teams	10,875
Active teams	2,356 (21.66%)
Last update user XML	2013-12-24 03:55:11 GMT (16:14:12 old)
Last update host XML	2013-12-24 04:14:26 GMT (15:54:57 old)
Last update team XML	2013-12-24 04:16:09 GMT (15:53:14 old)