重力波実験の現状と将来計画の重力波源

大阪市立大学理学研究科 神田展行 the TAMA collaboration

9/27/2004 日本物理学会秋季大会 27pSF-1



観測実験の最近のエポック 2002-2004 の観測運転: LIGO, GEO, TAMA VIRGO運転開始間近 LISAのロードマップ 将来計画について LCGT, LIGO-II 重力波源:探査の状況/将来計画での展望 連星合体 バースト重力波 連続波 Stochastic

観測実験の現状(~2004夏)

レーザー干渉計

TAMA(日) 1999年9回の観測 (total > 3000hour) LIGO(米), GEO(独英) S1(2002), S2(2003), S3(2003-4) VIRGO(伊仏) 2004年秋に最初のfull configurationでの運転

ACIGA(豪) (予算まだ)





LIGO and GEO





LIGO-G040300-00-Z



Four interferometers contribute data to LSC analyses:

•4 km and 2 km interferometers at LIGO Hanford Observatory

 4 km interferometer at LIGO Livingston Observatory

•GEO600

N.B.: No GEO data available for S2, but back on air for S3.

22 July 2004

(cont.) LIGO : Sensitivity



- ·S1(2002), S2(2003), S3(2003-4)
- \cdot factor for the design sensitivity

GEO: Runs & Sensitivity





- GEO600 optical configuration
 - Implemented as a dual recycled interferometer
- Coordinated Runs With LIGO
 - S1 run:

LIGO

- 23.08.02 09.09.02
- S3 run:
 - 05.11.03 12.11.03
 - 30.12.03 13.01.04
- GEO600 is continuously taking data since early 2004
- Calibration and Data Archive
 - Time-domain calibration; data calibrated every second
 - Data archived on tapes and/or on spinning media
 - Total data rate of ~ 50 GB per day
- Computational Resources
 - Beowulf clusters and storage at AEI, Birmingham and Cardiff (~ 400 dual processor nodes, ~ 100 Terabytes)
 - Tape archives at Cardiff and ZIB (access via AEI)



GR17 - Status of Data Analysis in GEO600

(cont.) GEO : Detection Range

LIGO





- InspiralSenseMon computes the distance at which an optimally oriented inspiralling binary produces a SNR of 8 given the noise PSD
- A figure-of-merit used to monitor online the sensitivity of the detector





Grw17 - Dublin

(cont.) VIRGO : shaking down the performance



C5 run be held in 2004 autumn.



National Astronomical Observatory (NAOJ), Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), The University of Tokyo, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), University of Electro-Communications, Osaka City University, Osaka University, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Niigata University, Hirosaki University, Tohoku University, Hiroshima University, Tokyo Denki University, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tokai University



(cont.) TAMA: Commissioning

<u>Data Taking</u>	period	<u>actual data amount</u>	<u>take note</u>
DT1	8/6 - 7/1999	~3 + ~7 hours continuous lock	first whole system test
DT2	9/17 - 20/1999	31 hours	first Physics run
DT3	4/20 - 23/2000	13 hours	
	8/14/2000	World best sensitivity	h ~ 5x10 ⁻²¹ [1/√Hz]
DT4	8/21 - 9/3/2000	167 hours	stable long run
DT5	3/1 - 3/8/2001	111 hours	
Test Run 1	6/4 - 6/6/2001	Longest stretch of continuous lock is 24:50	keep running all day
DT6	8/1 - 9/20/2001	1038 hours duty cycle 86%	full-dressed run
DT7	8/31 - 9/2/2002	24 hours with duty cycle 76.7%	Recycling, h ~ 3x10 ⁻²¹ [1/√Hz], Simultaneous obs with LIGO & GEO
DT8	2/14 - 4/14/2003	1168 hours, duty cycle 81.1%	coincidence obs with LIGO S2
DT9	10/31(Actually 11/ 28)/2003 - 1/5/2004	557 hours, duty 58.5% weekday: night time weekend: full time	partial coincidence run with LIGO S3 'crewless' operation





IGEC

ALLEGRO(米), AURIGA(伊) EXPLOLER(伊), NAUTILUS(スイス), NIOBE(豪)

球形アンテナ

Mini-GRAIL(蘭) GRAVITON (ブラジル)



共鳴型アンテナ×5台

観測:1997-2000

上限

H ~ 2x10⁻²¹ [/rHz]



The International Gravitational Event Collaboration

Fundamentals Documents **Detectors** F.A.Q. People Links Internal Characteristics Directional sensitivity

The IGEC Members

The following detectors participate into the IGEC. Click on a name to connect to the experiment web site.

In the picture below the detectors locations on earth are represented. It happens that there is a great circle passing near each site (red line on the picture below) This allows for parallel orientation of the bars.

ALLEGRO	Based in Louisiana, USA. Lousiana State University
AURIGA	Based in Padova, Italy. Legnaro National Laboratories, INFN
EXPLORER	Based in, Geneva, Switzerland. CERN, INFN
NAUTILUS	Based in Rome, Italy. Frascati National Laboratories, INFN
NIOBE	Based in Perth, Australia. University of Western Australia



"Methods and results of the IGEC search for burst gravitational waves in the years 1997-2000 ", Phys. Rev. D 68 (2003) 022001, (astro-ph/0302482)

Last modified 1379 days ago.

Top of Page

球形共鳴アンテナ

共鳴周波数が高い

ブラックホール準固有振動リングダウンや合体 フェーズの重力波をターゲット

1台で入射方向を決めうる



http://www.das.inpe.br/~graviton/

MiniGRAIL

Gravitational Radiation Antenna In Leiden

Kamerlingh Onnes Laboratory, Leiden University, The Netherlands

click here for an overview of the 6th cryogenic run of MiniGRAIL



The MiniGRAIL detector is a cryogenic 68 cm diameter spherical gravitational wave antenna made of CuAl(6%) alloy with a mass of 1400 Kg, a resonance frequency of 3000 Hz and a bandwidth around 230 Hz, possibly higher. The quantumlimited strain sensitivity dL/L would be ~4x10-21. The antenna will operate at a temperature of 20 mK. Two other similar detectors will also be built, one in Rome and one in S縊 Paulo (already financed), which will strongly increase the chances of detection by looking at coincidences. The sources we are aiming at are for instance, nonaxisymmetric instabilities in rotating single and binary neutron stars, small black-hole or neutronstar mergers etc.

http://www.minigrail.nl/

同時観測

⊖ LIGO - GEO

● LIGO - ALLEGRO

データ解析については、LSC (LIGO Scientific Collaboration) が横断的な組 織になっている

⊖ LIGO - HETE2

GRBトリガーと重力波検出器のバーストイベント

TAMA - LIGO

TAMA と LIGO(LSC)で同時観測についてのワーキンググループが設けられ、 そこで進行している。

連星合体、バースト重力波、GRBなどの外部トリガについて解析中

- ⊖ TAMA-LISM
- TAMA ROG(ローマ大の共鳴アンテナ)



23 July, 2004



Coincidence Schematics





TAMA300 + LISM20 (20m IF, Kamoka) 雑音棄却率 < 10⁻⁴

H.Takahashi et. al., PRD70, 042003



スペース

LISA ESA/NASA 3台のスペースクラフト 2012/2013年 打ち上げ予定

Schematic of LISA's Orbit



テスト機:

http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=1

LISA pathfinder(Smart-II) 2008年

(BBO, DECIGO)

Remark: 将来計画について



LCGT 低温、基線長3km、地下(神岡)

advLIGO



http://www.ligo.caltech.edu/advLlGO/

http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/gr/plans.html

(cont.) Detector sensitivity : LCGT VS TAMA









コンパクト連星が地上検出器の対象 中性子星(NS)連星 ブラックホール(BH)連星 MACHO連星 現在(2004)は観測上限値 探索レンジは銀河系~局所銀河団 数100~1000時間の観測 -> 数10個/年/銀河 予想頻度からすると桁違いに悪い |将来計画(LCGT, LIGO-II)では数10個/年の観測を目 標とする



• Parameters : mass, Kerr parameter



新しい連星パルサーの発見

PSR J0737-3039 Burgay M. et al. 2004, Nature, 426, 531

	$P_s \; [\mathrm{ms}]$	\dot{P}_s [s/s]	P_{orbit} [hour]	e	$M_{total} \ [M_{\odot}]$	$ au_{sd} \; [\mathrm{Myr}]$	$ au_{mrg} [\mathrm{Myr}]$
BI9I3+I6	59.03	8.6x10-18	7.8	0.61	2.8	65	300
BI534+I2	37.90	2.4×10-18	10.0	0.27	2.7	190	2700
J0737-3039	22.70	2.4×10-18	2.4	0.087	2.6	100	85

 au_{sd} スピンダウン年齢

 au_{mrg} 合体までの残り時間

$$\tau_{life} = \tau_{sd} + \tau_{mrg}$$

(cont.) 連星合体の頻度(存在確率)



連星合体の信号



インスパイラル

もっとも"確実な"探索対象

特徴的な波形

PN近似で予想波形 → マッチドフィルター

周波数(=軌道位相)発展 → 星の質量

振幅 → 重力波源までの距離

*入射方向、偏極を解く必要があるので完全には複数検出器が必要

宇宙の"灯台"

重力波源としてすでに間接証明がある PSR1913+16

Taylor J.H., et. al., Astrophys. J. 345, 434-450

Matched Filter

Known wave form

 coalescence of compact binaries;
 NS-NS, NS-BH, BH-BH, PBMACHO

 Known noise spectrum in Fourier domain
 Linear system

 signal: s(t) = n(t) + a h(t)
 noise component :n(t), GW signal: a h(t)
 average noise power spectrum: S_h(f)

template waveform: h(t)signal-to-noise ratio: $SNR = \rho/\sqrt{2}$

$$\rho(\tau;\text{parameters}) = 2 \int_{f_1}^{f_2} \frac{\tilde{h}^*(f)\cdot\tilde{s}(f)}{S_h(f)} e^{-i2\pi f\tau} df$$
 chi^2 test

(cont.) インスパイラル

Caltech 40m

```
Upper Limit: <0.5 event/h C.L.90%, Deff ~ 25 kpc
                              B.Allen et. al., Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 1498-1501
TAMA
   DT<sub>2</sub>
     0.59 event/h C.L.90%, Range ~ 3.4 kpc
                                 H.Tagoshi et. al., Phys. Rev. D63 (2000) 062001
   DT8 (2003春)
     29 event/yr C.L.90%, Range ~42.2 kpc
   DT9 (2003秋)
     Range ~72.5 kpc
LIGO
  S1(2002夏)
     170 event/yr for MWEG(銀河系+大小マゼラン)
     Deff ~ 176kp (L1), 46kpc (H1)
                                                 Phys.Rev.D69 (2004) 122001
   52(2003春)
     PRELIMINARY < 50 event/yr for MWEG, Range ~ 6.8Mpc
   53(2003秋)
```

註:検出可能距離の定義が、グループで少しずつ違う...

(cont.) LIGO: S1 result



LIGO S1 typical spectrum and GW (PRD69,122001)

170 event/yr (C.L.90%), for MWEG



(cont.) TAMA: Detection Range

SNR =
$$\sqrt{2} A \left[4 \int \frac{f^{-\frac{7}{3}}}{S_n(f)} df \right]^{\frac{1}{2}}$$
 $A = T_{\odot} \frac{c}{d} \left(\frac{5\mu}{96M_{\odot}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M}{\pi^2 M_{\odot}} \right)^{\frac{1}{3}} T_{\odot}^{-\frac{1}{6}}$
 $T_{\odot} = \left(\frac{G}{c^3} \right) M_{\odot}$





現在の観測は上限値...

将来計画で見込まれるイベント数は? 現在デザインしている感度でどのくらい探索できる のか?

(cont.) LCGT の連星合体(インスパイラル)探索範囲



(cont.) LCGTの探索レンジとイベント期待値

感度デザイン

🔵 1.4-1.4 Msolar 連星合体

● インスパイラル重力波

● 最適方向入射, SNR>10 でレンジは240 Mpc

実効的には?

- 探索体積:106 Mpcの球に相当
- イベント数期待値:12.6 ev/yr (2.2-52.6 event/yr C.L.95%)

by D.Tatsumi

観測される中性子連星合体イベントの期待値 N_{NS} は

- 1. 銀河あたりの合体頻度 R
- 2. 銀河の数密度 ρ_{galaxy}
- 3. 重力波検出器 1 台で探査可能な体積 $V_{\text{eff}} = \frac{4\pi}{3} r_{\text{eff}}^{3}$

の積で表され、それぞれの推定値は表1に示した通りである。

表 1: 観測される中性子連星合体イベントの期待値 N_{NS}

銀河あたりの合体頻度	$\mathcal R$	$\rm Myr^{-1}$	$180 \ ^{+477}_{-144}$	信頼度 95%
銀河の数密度	$ ho_{ m galaxy}$	$\rm Mpc^{-3}$	$(1.4 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	
探査可能な体積	$V_{ m eff}$	Mpc^3	5×10^{6}	$(r_{\rm eff}=106~{\rm Mpc})$
イベント数	$N_{\rm NS}$	events / year	$12.6 \ ^{+40.0}_{-10.4}$	

2、3年運転で数10イベ

ント得られれば、

->

- ・存在頻度の決定
- ・中性子星の物理 (合体や リングダウン波形と情報を合わせ て)

が可能となる。

これらから、観測される中性子連星合体イベントは『 最頻値が 12.6 events/year、 信頼度 95 % では 2.2 – 52.6 events/year 』 と推定される。

BH準固有振動リングダウン

BH準固有振動(Quasi-Normal Mode) T.Regge and J.Wheeler (1957) F.Zerilli (1970) ブラックホール時空の摂動解 S. Teukolsky(1972,1973) S.Detweiler (1980) etc. リングダウン重力波 $h(t) = Ae^{-\pi \frac{f_c t}{Q}} \sin(2\pi f_c t)$ 20 x1C⁻¹⁸ 0 連星合体の後にBHが形成されれば、 -20 準固有振動が励起されるだろう。 -40 1.62 1.64 1.66 time [sec]

$$f_c \sim rac{3.2 imes 10^4}{M} \left[1 - 0.63(1-a)^{0.3}
ight] ~[{\rm Hz}]$$
 F.Echeverria (1989) $Q \sim 2.0(1-a)^{-0.45}$

理論的には波形予想されてい るのに、いままであまり探索 されていない

40mでのテスト的な研究と、最近の TAMAくらい

理由:

振幅の予想(=励起の大き さ)がよくわからない 周波数が高い

1.4-1.4 Msolar で形成された場合 7kHzくらい

雑音棄却がむづかしい

テンプレートデザイン 筆



しかし、

観測周波数帯域の高い検出器

TAMA, 球形共鳴アンテナ

より感度の高い検出器

LCGT, LIGO II にとっては探索対象と なりうる。



テンプレートのデザイン

H.Nakano et. al., Phys.Rev.D68,102003(2004)



Q

インスパイラルと相補的なサーチ

コインシデンス より重い質量範囲 -> 10-1000 Msolar BHのパラメーターの決定 周波数 ---> 質量 ΔM/M ~ a few -10 % Q(減衰時間) ---> 角運動量(Kerr パラメター)

Q^M	$\left(\Delta f_c/f_c ight)_{ m RMS}$	$\left(\Delta Q/Q\right)_{ m RMS}$	$(\Delta M/M)_{\rm RMS}$	$(\Delta a/a)_{\rm RMS}$
All	1.3(1.22)	22(16.3)		
2.55	8.1(2.58)	22(15.8)	22	64
4.41	4.0 (1.63)	24(16.1)	13	41
7.70	1.6(0.99)	21(16.4)	6.8	39
13.6	0.77(0.58)	19(16.5)	3.1	40
24.0	0.39 (0.33)	19(16.7)	1.9	41

TABLE I: RMS errors in estimations of ringdown - black hole parameters (in %) by using the template bank of MM = 0.98. The quantities are defined as $\Delta X/X \equiv (X^M - X^S)/X^S$, $(X = f_c, Q, M, a)$. For comparison, analytic estimations from the template distances, which should be obtained in the absence of noise fluctuations, are also shown (parenthesized). The parameter conversions $(f_c, Q) \leftrightarrow (M, a)$ are based on the Echeverria's expressions in equations (2) and (3).



合体フェーズ



Oechslin, Uryu, Poghosyan, Thielemann, Mon.Not.R.Astron.Soc. 349,1469(2004)

バースト重力波



コアの崩壊でバースト重力波の放出 1~10 msec のタイムスケール

シミュレーションによる波形予想

Komatsu et al. (1989) Zwerger & Müler (1997) Dimmelmeier et.al., (2001,2002)

(どうも、10年くらい前にいわ れていたよりも、ずっと小さい…)





Fig. 17. Prospects of detection of the gravitational wave signal from axisymmetric rotational supernova core collapse in relativistic (black filled circles) and Newtonian (red unfilled circles) gravity. The figure gives the (dimensionless) gravitational wave amplitude h^{TT} and the frequency range for all 26 models. For a source at a distance of 10 kpc the signals of all models are above the burst sensitivity of the LIGO I detector (except for some low amplitude, high frequency models), and well above that of the LIGO II interferometer. The burst sensitivity gives the r.m.s. noise amplitude $h_{\rm rms} \sim \sqrt{\nu S(\nu)}$ over a bandwith of width ν at a frequency ν for the instrument noise power spectral density $S(\nu)$. The error bars mark the frequency range inside which the spectral energy density is within 50% of its peak value.

Harald Dimmelmeier, Jose A. Font, Ewald Mueller, Astron.Astrophys. 393 (2002) 523-542

距離10kpc で典型的にh~1x10⁻²⁰, 100-1000Hz

バースト波の探索方法

検出器の非定常雑音との区別が決め手

• Excess power フィルター



(cont.) バースト波探索 TAMA

●データ解析結果

veto解析後のイベントレート イベントレートの大幅な改善 DT8:2つのvetoが,共に効果的 DT9:強度vetoの効果が大きい

DT9では、DT8から大幅な改善 ある振幅に着目 → イベントレート1.5-2桁の改善 あるイベントレートに着目 → 感度が3-6倍向上

LIGO (S2, DT8と同時観測)の結果 (TF cluster filter, SG 1200Hz) ンフェイクが少なく、より安定



バースト波探索 LIGO S1

LIGO S1 観測運転の解析結果 *rate* VS h_{rss} モデル波形で結果が少し異 なる

Phys.Rev.D69,102001 (2004)





FIG. 15. Rate versus $h_{\rm rss}$ for detection of specific waveforms using the TFCLUSTERS event trigger generator. The region above and to the right of the curves is excluded at 90% confidence level or greater. The effect of the 20% uncertainty in the detector response is included. Top: for Gaussians with τ =1.0 ms and τ =2.5 ms. Bottom: for sine Gaussians with Q=9 and central frequency f_0 = 361, 554, 850, and 1304 Hz.

バースト波は重力波源としては期待大

将来計画の感度向上次第

T.Damour & A.Vilenkin, Phys.Rev.D 64, 064008



FIG. 1. Gravitational wave amplitude of bursts emitted by cosmic string cusps (upper curves) and kinks (lower curve) in the LIGO-VIRGO frequency band, as a function of the parameter α = 50G μ (in a base-10 log-log plot). The upper curve assumes that the average number of cusps per loop oscillation is c=1. The middle curve assumes c=0.1. The lower curve gives the kink signal (assuming only one kink per loop). The horizontal dashed lines indicate the one sigma noise levels (after optimal filtering) of LIGO 1 (initial detector) and LIGO 2 (advanced configuration). The shortdashed line indicates the "confusion" amplitude noise of the stochastic GW background.



FIG. 2. Gravitational wave amplitude of bursts emitted by cosmic string cusps (upper curves) and kinks (lower curve) in the LISA frequency band, as a function of the parameter $\alpha = 50G\mu$ (in a base-10 log-log plot). The meaning of the three solid curves is as in Fig. 1. The short-dashed slanted curve indicates the confusion noise. The lower long-dashed line indicates the one sigma noise level (after optimal filtering) of LISA.

重力波源(点源)の方向決定精度

ここまで説明した重力波源は、点源で短時間のイベン トのもの。

75

これらについて、方向は求められるのだろうか?

Ans. 4台以上の検出器が必要



(cont.) 重力波源の方向決定精度





	Hz	kpc	h
Crab	60	2.3	le-24
Vela	22	0.5	le-24
SNI987A	935	50	le-26

GW放出によるエネルギー損失率

$$L_{GW} = \frac{32G}{5c^5} \epsilon^2 I_3^2 \Omega^6$$

Ωはパルサーの周波数、 重力波周波数の半分 (cont.) 連続波:探索

CRAB IV (Iは1977) かにパルサー , 30Hz h< 2x10⁻²² Suzuki et. al.,1993 TAMA

SN1987A remnant = Search range: 934.908 ±0.05 Hz

Upper limit: $h \sim 5 \times 10^{-23}$ (C.L> 99%) with 1200 hours TAMA data (dt4,dt6)

Soida et al. Class. Quant. Grav.Vol.20. No.17(2003)S645

LIGO + GEO S1

J1939+2134 Phys.Rev.D69, 082004



(cont.) LIGO + GEO S1



TABLE IV. Summary of the 95% upper limit values of h_0 for PSR J1939+2134. The frequency domain search (FDS) quotes a conservative frequentist upper limit and the time domain search (TDS) a Bayesian upper limit after marginalizing over the unknown ι , ψ , and ϕ_0 parameters.

IFO	Frequentist FDS	Bayesian TDS
GEO	$(1.9\pm0.1)\times10^{-21}$	$(2.2\pm0.1)\times10^{-21}$
L1	$(2.7\pm0.3)\times10^{-22}$	$(1.4\pm0.1)\times10^{-22}$
HI	$(5.4\pm0.6) \times 10^{-22}$	$(3.3\pm0.3)\times10^{-22}$
H2	$(4.0\pm0.5)\times10^{-22}$	$(2.4\pm0.2)\times10^{-22}$

FIG. 1. (Color) Upper curves: characteristic amplitude $\langle h_0 \rangle$ of a known monochromatic signal detectable with a 1% false alarm rate and a 10%false dismissal rate by the GEO and LIGO detectors at S1 sensitivity and with an observation time equal to the up-time of the detectors during S1 (GEO: 401 h, L1:137 h, H1: 209 h, H2: 214 h). Lower curves: $\langle h_0 \rangle$ for the design sensitivities of the detectors for an assumed 1-yr observation time. Solid circles: upper limit on $\langle h_0 \rangle$ from the measured spin-down rate of known radio pulsars assuming a moment of inertia of 10^{45} g cm². These upper limits were derived under the assumption that all the measured loss of angular momentum of the star is due to the emission of gravitational waves, neglecting the spin-down contribution from electromagnetic and particle emission. The arrow points to the solid circle representing pulsar J1939+2134.

U.L. h ~ factor x 10^{-22}

Phys.Rev.D69, 082004

LCGTによる連続波探索の可能性



(cont.) LCGTによる連続波探索の可能性

LCGT1年観測SNR>10

Pulsar	Dist. [kpc]	Freq. [Hz]	Age [Yr]	hmax	SNR (lyr)
Crab	2.0	60	1200	7.2e-25	910
Vela	0.5	22	I.Ie4	9.5e-25	240
1951+32	2.5	50	l.1e5	6.2e-25	65
1706-44	I.8	20	I.7e4	2.1e-25	40
1509-58	4.4	13	I.6e3	2.9e-25	26
0540-69	4.9	40	I.7e3	2.5e-26	18
1823-13	4.I	20	2.1e4	8.4e-26	16
1046-58	3.0	16	2.0e4	I.2e-25	16
1259-63	4.6	42	3.3e5	I.9e-26	15
1800-21	3.9	15	I.6e4	I.0e-25	12
	0.15	347	I.6e9	5.1e-23	
1757-24	4.6	16	I.5e4	8.9e-26	

by Y.Tsunesada

Stochastic



Cosmological Origin inflation string cosmology cosmic string 1st order phase transition at EW scale

$$\Omega_{gw}(f) = \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{gw}}{d\log f}$$

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G_N}$$
 : critical density

 ρ_{gw} : energy density of stochastic GW

(cont.) Stochastic : cosmlogical



M.Maggiore, gr-qc/0008027

Stochastic: LIGO S1

50 + 100 hour data 周波数帯域:40-314 Hz

 $\Omega_0 h_{100}^2 \le 23 \pm 4.6$

 $h_{100} \equiv \frac{H_0}{H_{100}}$

$H_{100} \equiv 100 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{sec} \cdot \mathrm{Mpc}} \approx 3.24 \times 10^{-18} \mathrm{sc}^{-18} \mathrm{sc}^$	$\frac{1}{\sec}$

Observational technique	Observed limit	Frequency domain	Comments
Cosmic microwave background	$\Omega_{\rm gw}(f) h_{100}^2 \le 10^{-13} \left(\frac{10^{-16} \text{ Hz}}{f} \right)^2$	$3 \times 10^{-18} < f < 10^{-16} \text{ Hz}$	[24]
Radio pulsar timing	$\Omega_{\rm gw}(f)h_{100}^2 \le 9.3 \times 10^{-8}$	$4 \times 10^{-9} < f < 4 \times 10^{-8}$ Hz	95% C.L. bound, [25]
Big-bang nucleosynthesis	$\int_{f>10^{-8} \text{ Hz}} d\ln f \Omega_{\text{gw}}(f) h_{100}^2 \leq 10^{-5}$	$f > 10^{-8} \text{ Hz}$	95% C.L. bound, [26]
Interferometers	$\Omega_{\rm gw}(f)h_{100}^2 \le 3 \times 10^5$	100≲ <i>f</i> ≲1000 Hz	Garching-Glasgow [28]
Room temperature			
Resonant bar (correlation)	$\Omega_{\rm gw}(f_0) h_{100}^2 \leq 3000$	$f_0 = 985 \pm 80 \text{ Hz}$	Glasgow [27]
Cryogenic resonant bar (single)	$\Omega_{\rm gw}(f_0)h_{100}^2 \leq 300$	$f_0 = 907 \text{ Hz}$	Explorer [29]
	$\Omega_{\rm gw}(f_0) h_{100}^2 \leq 5000$	$f_0 = 1875 \text{ Hz}$	ALTAIR [30]
Cryogenic resonant bar (correlation)	$\Omega_{\rm gw}(f_0) h_{100}^2 \leq 60$	$f_0 = 907 \text{ Hz}$	Explorer+Nautilus [31,32]

Phys.Rev.D69, 122004

まとめ

● 大型干渉計の観測運転開始
 TAMA, LIGO, VIRGO
 LIGOはデザイン感度に肉薄している
 現在の感度では、イベント検出は厳しい

●種々の重力波について解析がなされている 発見の報告はないが、上限値は日々更新中

● 将来計画の必要性
 LCGT, LIGO II ならば検出が見込める

special thanks to:

P.Saulson, P.Sutton (LIGO) B.S.Sathyaprakash (GEO) R.Barille (VIRGO) M. MacHugh (ALLEGRO)

M.Ando, H.Nakano, H.Tagoshi, H.Takahashi, D.Tatsumi, Y.Tsunesada (TAMA)