

重力波をとらえる



安東 正樹 (東京大学 理学系研究科, TAMA collaboration)

ICEPP-Symposium 10 (2004年2月15日-18日 岳美山荘, 白馬, 長野)



第I部 重力波検出器の現状と結果

目次



1. 重力波とその検出

重力波とその検出の意義
歴史と現状

2. TAMA300の概要

概要, 干渉計方式

3. TAMA300の要素技術

各種雑音の低減
制御

4. TAMA300での観測・データ解析

観測運転とデータ解析の概要
チャープ波解析, バースト波解析

5. まとめ

目次



1. 重力波とその検出

重力波とその検出の意義 歴史と現状

重力波とその検出 (1)

- 重力波による天文学 -



● 重力波 (時空のさざなみ)



A. Einstein
(TAMAプロジェクトパンフレットより)

一般相対性理論, アインシュタイン方程式

⇒ 波動解 (光の速度で伝播する時空の歪み)

連星パルサーの公転周期の観測により存在証明

特徴:

質量の加速度運動により生成

(⇔ 電磁波: 電荷の加速度運動により生成)

強い透過力 (物質との相互作用が小さい)

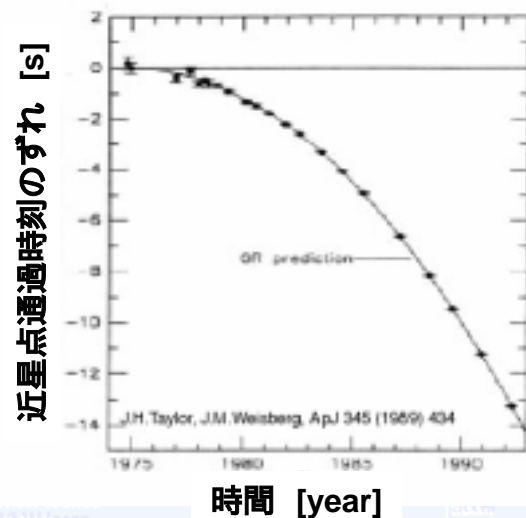


「重力波天文学」の可能性

電磁波による天文学とは質の異なる情報

天体内部のダイナミックな運動の観測

電磁波では見ることのできない初期宇宙



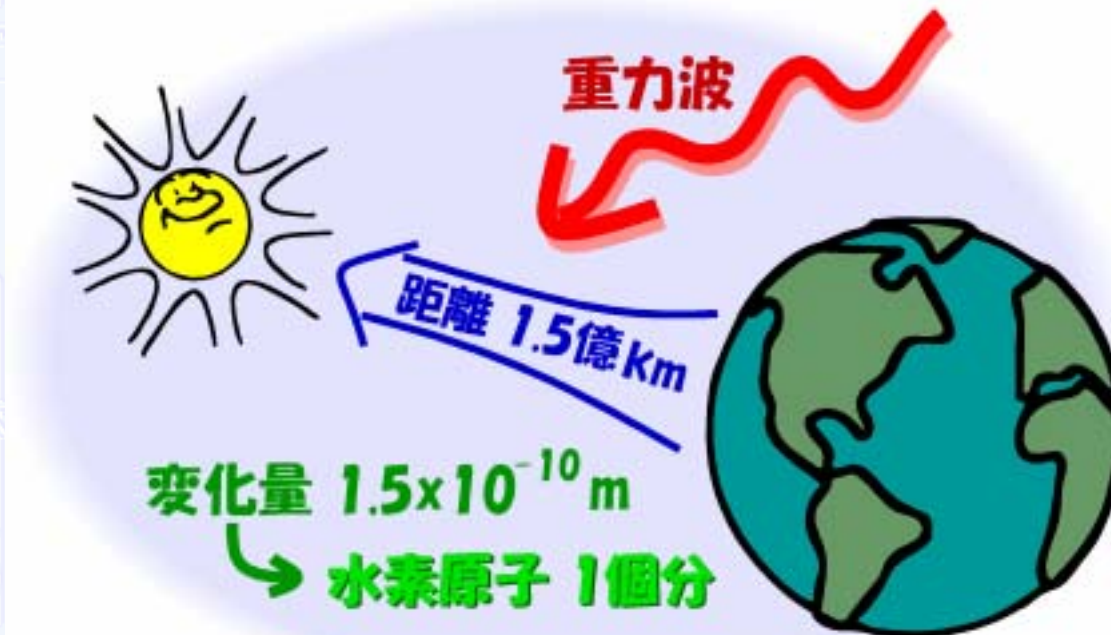
重力波とその検出 (2)

- 重力波は未検出 -



• しかし...

まだ直接検出されていない (効果が非常に小さいため)



10^{-21} の歪み

微小検出技術が必要

重力波とその検出 (3)

- 人工重力波の発生 -



●重力波の生成

大質量の激しい加速度運動で発生
(四重極モーメントの時間変化)

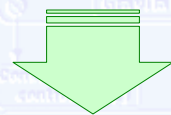
重力の発生実験 ...

質量 1 ton, 長さ10 mのダンベル
周波数 10Hzで回転



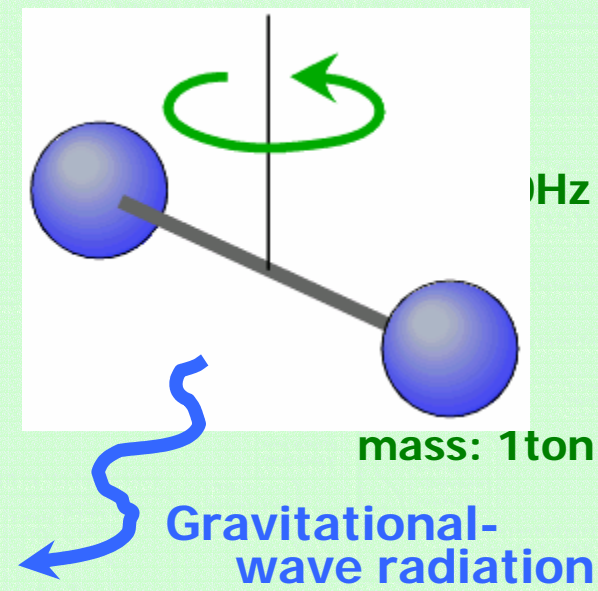
周波数 20Hz,
振幅 $h \sim 5 \times 10^{-43}$ の重力波

... 検出は無理



天体起源の重力波検出をめざす

GW generation experiment



重力波とその検出 (4)

- 重力波源 -



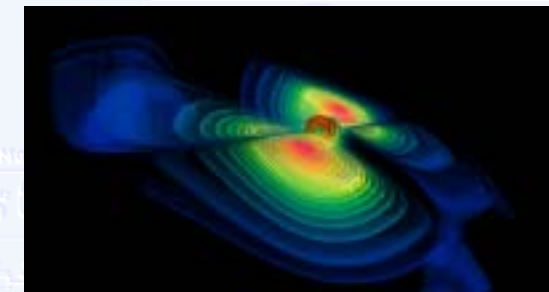
- 重力波源

- コンパクト連星のインスパイラル: **chirps**

- Change in signal frequency (low → high)

- Waveforms are well predicted (2.5 PN)

- Search technique: matched templates



- 星の重力崩壊, 連星の合体: **bursts**

- Short GW signals from violent phenomena

- Precise waveforms are not available

- Possible coincidence with

- electromagnetic and/or neutrino observations



- ブラックホールの準固有振動: **ringdown**

- Damped sinusoidal waves from a quasi-normal mode

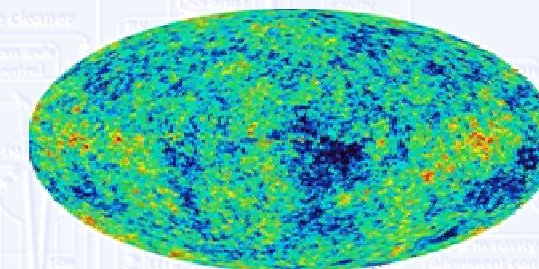
- パルサー, コンパクト連星: **periodic**

- Continuous GW signals

- Gain SNR with long-term observations

- 初期宇宙起源の重力波: **stochastic background**

- Information just after the Big Bang



重力波とその検出 (5)

- 天体現象の観測 -



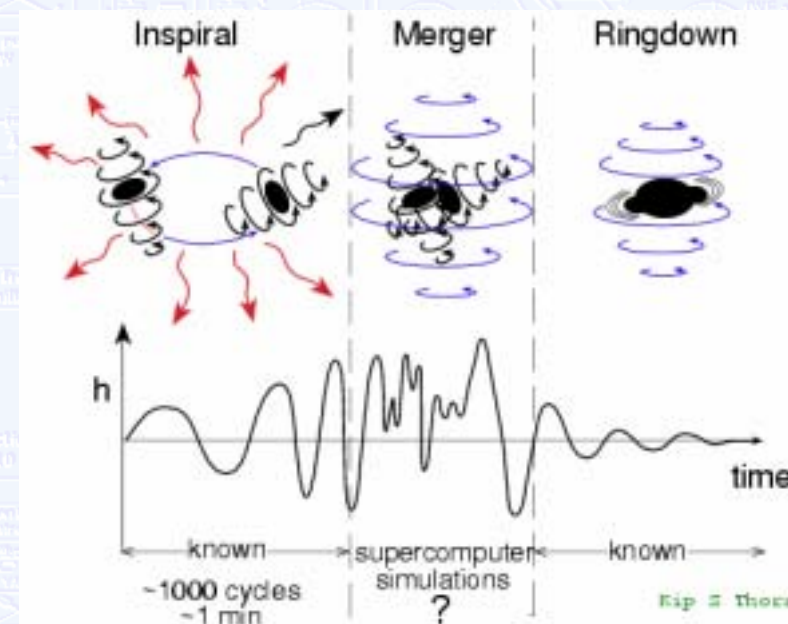
Example of astronomical phenomena:

GW signals from compact binaries

- Stable phase : **Continuous**
- Inspiral phase : **Chirps**
- Merger phase : **Bursts**
- Ringdown phase : **Ringdowns**



重力波によって直接検出可能



重力波とその検出 (6)

- 重力波の効果 -



● 重力波の検出

重力波の効果

自由質点間の距離の変化

大きさを持った物体への潮汐力

横波

四重極特性：

直交する方向で差動に変動

2つの偏光 (+モード, xモード)

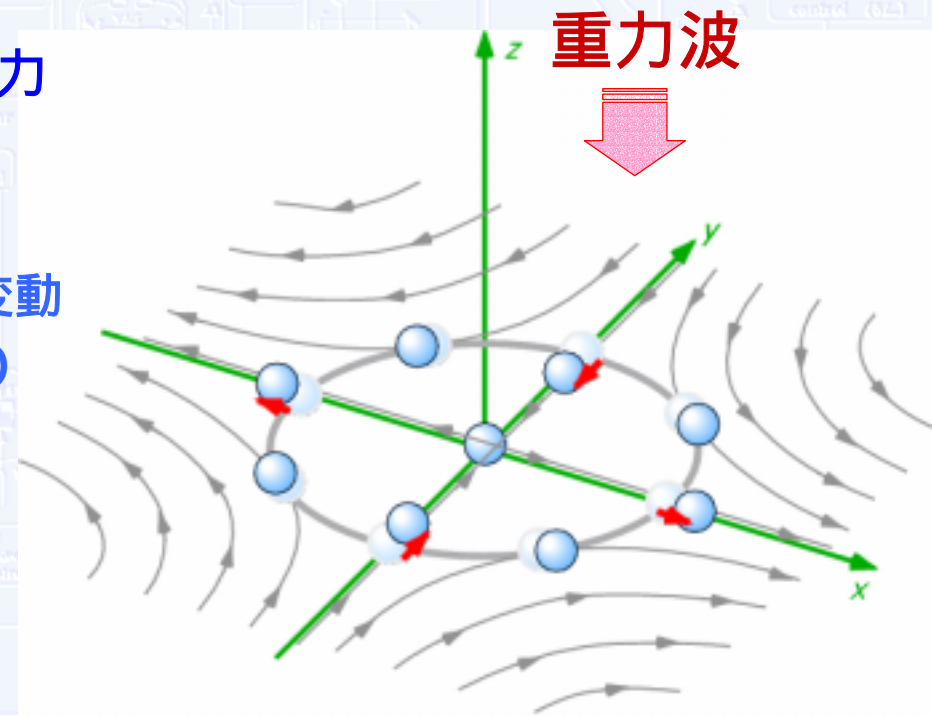


これらの性質を利用して検出

共振型検出器

自由質点型検出器

(レーザー干渉計型)



重力波とその検出 (7)

- 重力波の検出 -



●共振型重力波検出器

弾性体に働く潮汐力を検出

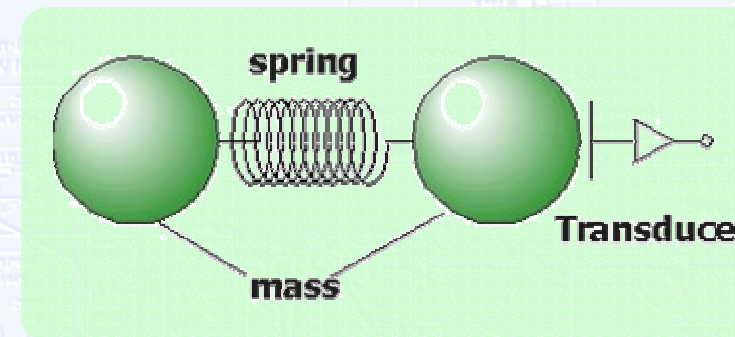
大きな弾性体

(Al5056, 重さ 2ton, 長さ3m)

低雑音トランスデューサ

低温 → 0.1 K

共振周波数 1kHz付近



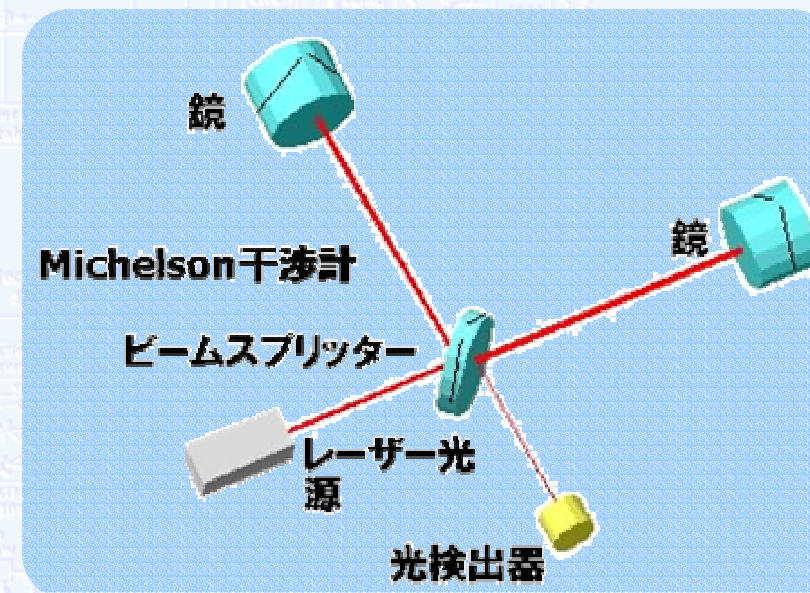
●自由質点型検出器

自由質点間の距離を測定

(レーザー干渉計型検出器)

長基線長レーザー干渉計

(300m - 4km)

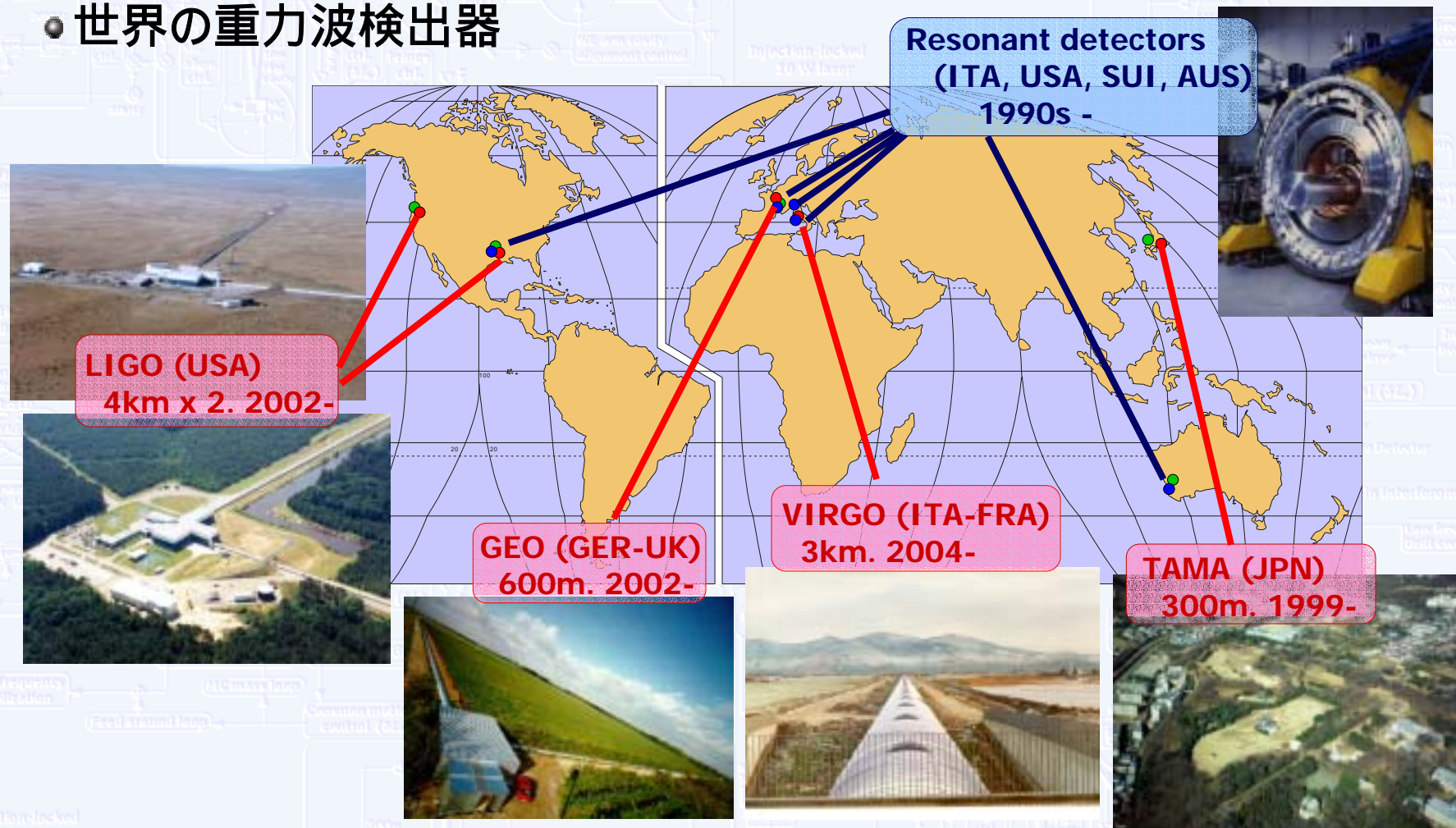


重力波とその検出 (8)

- 世界の重力波検出器 -



● 世界の重力波検出器



重力波とその検出 (9)

- 重力波検出の歴史 -



- 1916年 一般相対性理論、重力波の存在予言 (A.Einstein)
- 1960年代 共振型検出器の開発開始
- 1969年 重力波の発見報告 (J.Weber)
- 1970年代 世界各国での検証実験 干渉計型検出器の基礎実験
否定的結論
重力波の存在の検証 (R.A.Hulse, J.H.Taylor)
- 1980年代 改良と観測
- 1990年代 検出器ネットワーク 本格的な検出器の建設開始
- 1999年 観測開始 (TAMA)
- 2002年 コインシデンス解析 観測開始 (LIGO)
- 2003年 コインシデンス解析開始

目次



2. TAMA300の開発

概要

干渉計方式

TAMA300の概要 (1)

- 概要 -



● TAMAプロジェクト (1995建設開始)

国内の各研究機関が協力

(国立天文台, 東京大・物理, 東京大・宇宙線研, 高工研, 東京大・地震研, 電通大, 東京大・新領域, 東海大, 東京電機大, 計量研, 近畿大, 京都大, 大阪大, 大阪市大, 東大天文, 新潟大, 東北大, 広島大, 弘前大, ...)

基線長300mの重力波検出器 (TAMA300)

将来の大型干渉計
に向けての技術開発
実証型検出器
(銀河系内のイベント)



銀河系内の重力波イベント
に対して十分な感度
(世界最高感度 2000-2002年)
他の干渉計に先駆けた観測運転
(2000時間を超える観測データ)

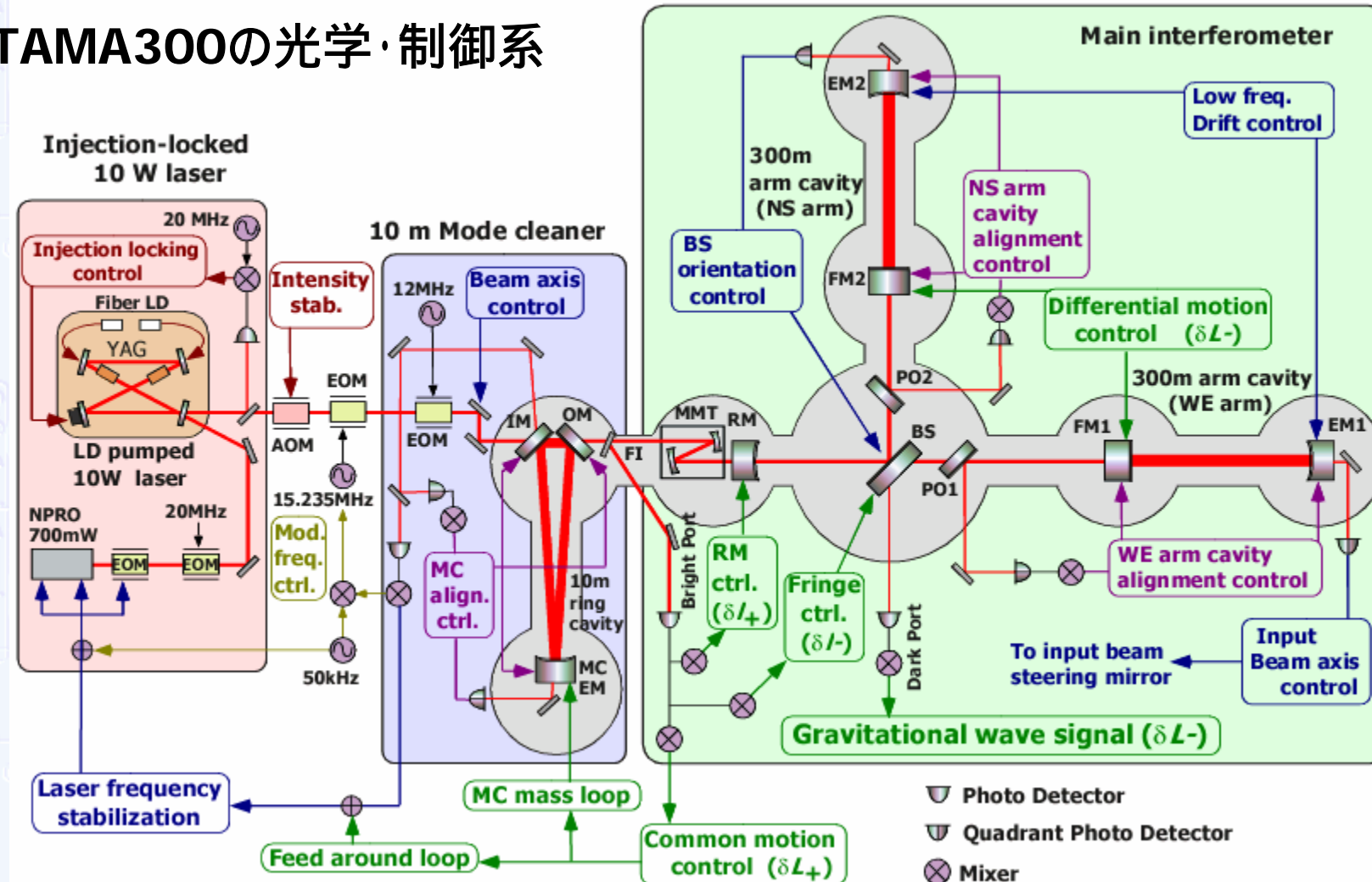


TAMA300の概要 (3)

- 干渉計全体の制御 -



TAMA300の光学・制御系



TAMA300の概要 (4)

- TAMA300の写真 -



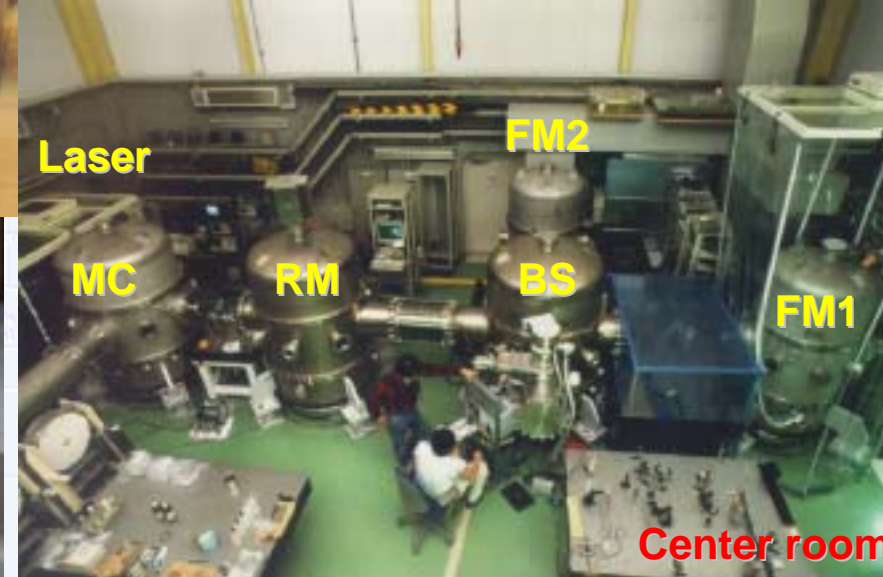
Mirror suspension



300m vacuum duct



Fused silica mirror



Center room

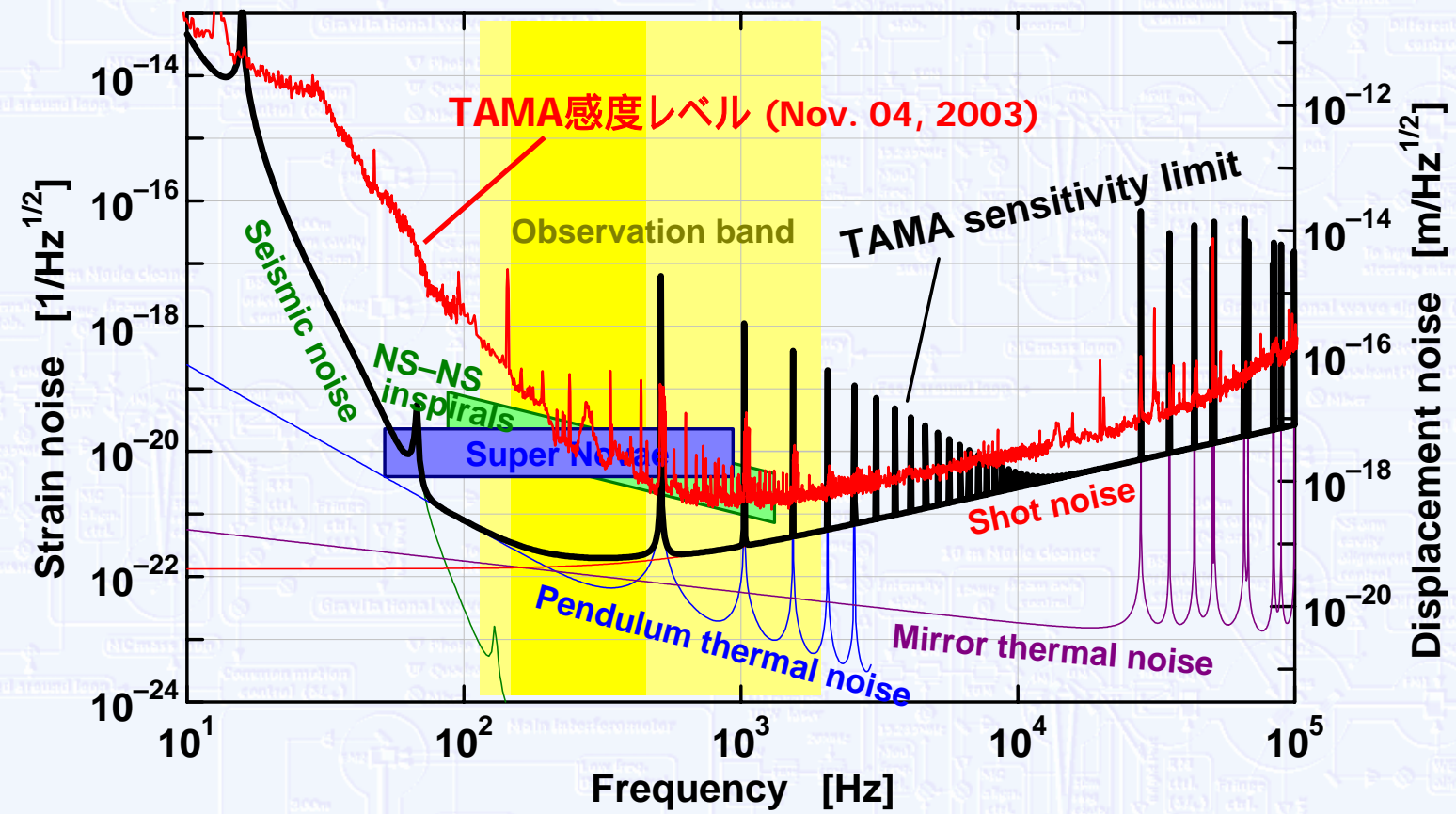
TAMA300の概要 (5)

- 感度限界と現状 -



● TAMA感度限界

フロアレベル : $2 \times 10^{-22} / \text{Hz}^{1/2}$ 歪み感度 : $h \sim 3 \times 10^{-21}$



TAMA300の概要 (6)

- 感度の向上 -



● 干渉計型重力波検出器の感度限界

● 地面振動

地面の振動が鏡を揺らす影響

➡ 防振装置、長基線長、静かなサイト

● 熱雑音 (鏡の熱雑音・振り子の熱雑音)

鏡やその支持系の熱振動

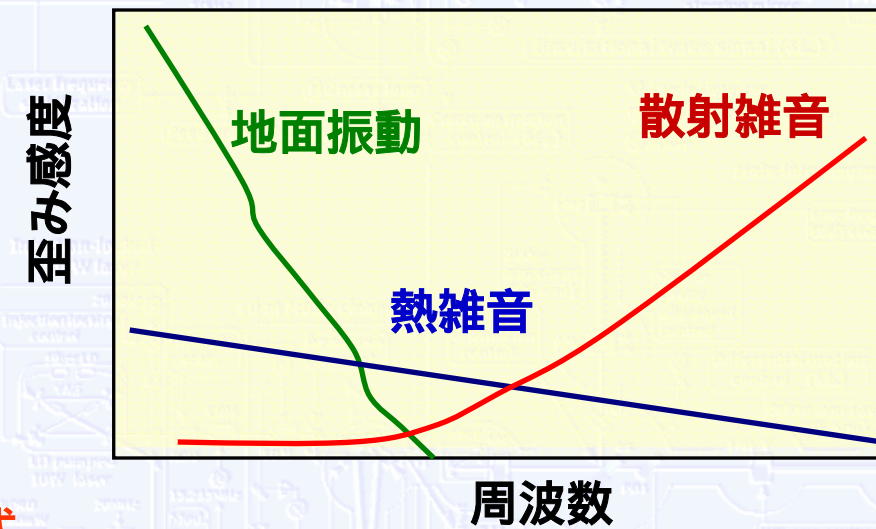
➡ 高いQ値、鏡などの冷却、長基線長

● 量子雑音 (散乱雑音・輻射圧雑音)

レーザー光が光子の集合
であることに起因する雑音

➡ 高出力レーザー、干渉計方式

干渉計型重力波検出器の感度限界



TAMA300の概要 (7)

- 干渉計方式と量子雑音 -



干渉計における原理的な雑音

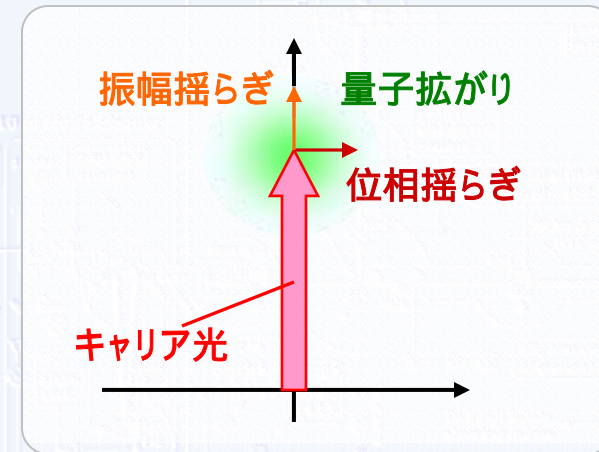
光の量子雑音 (optical readout noise)

散射雑音 (shot noise)

光の位相の量子的揺らぎに起因
光パワーの平方根に反比例

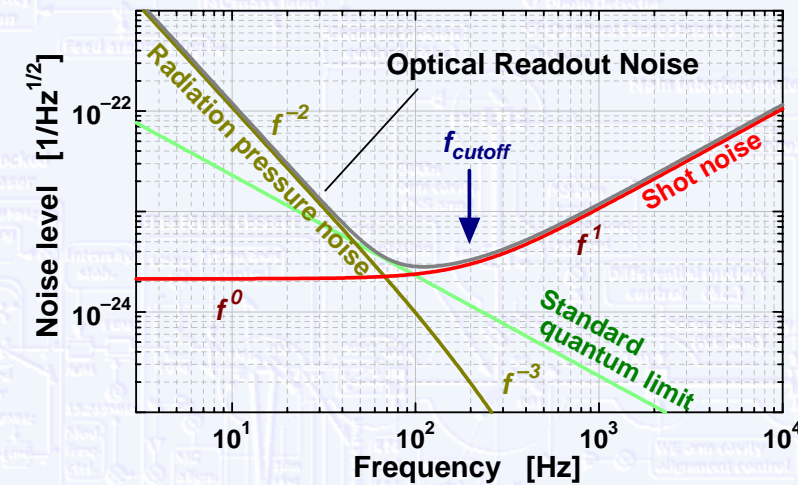
輻射圧雑音 (radiation pressure noise)

光の振幅の量子的揺らぎに起因
光パワーの平方根に比例



標準量子限界 (不確定性関係に対応)

$$h_{\text{SQL}} = \frac{1}{2\pi L f} \sqrt{\frac{8\hbar}{m}}$$



TAMA300の概要 (8)

- 実際の検出器構成 -



- 干渉計方式

マイケルソン干渉計に鏡を追加

⇒ 感度の向上

(標準量子限界に近づける)

- パワーリサイクリングされた
ファブリ・ペロー・
マイケルソン干渉計

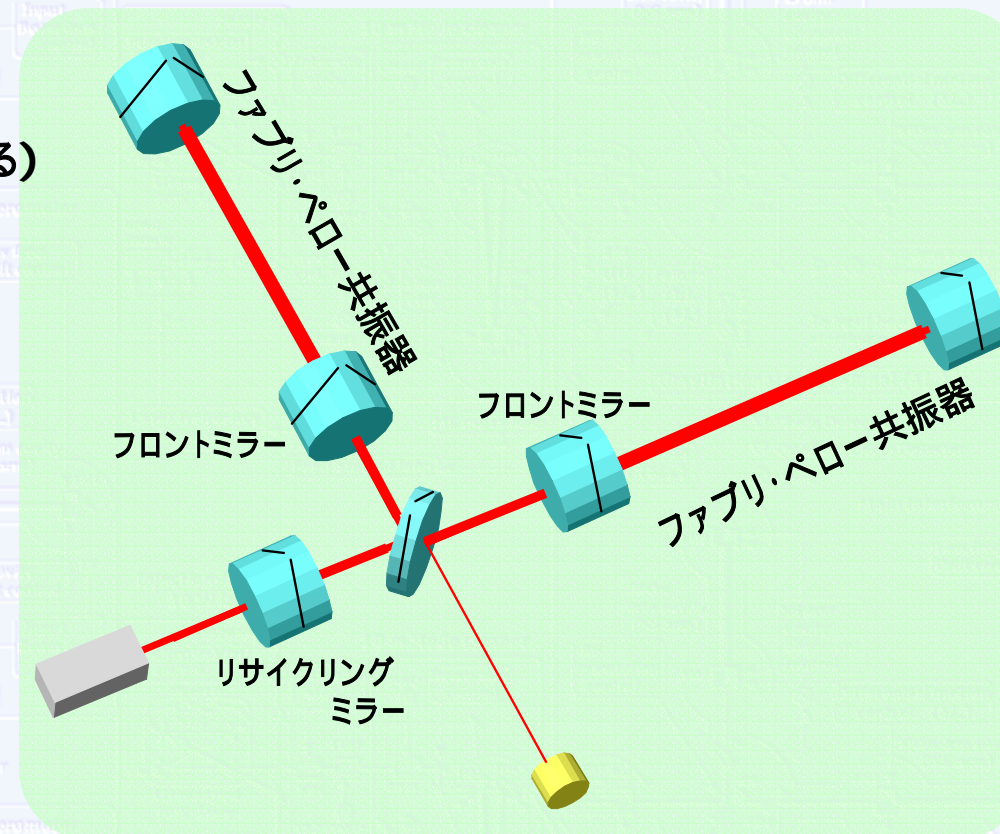
(LIGO, VIRGO, TAMA)

- ファブリ・ペロー共振器

実効的な基線長を延ばす

- パワーリサイクリング

実効的な光量を増やす



TAMA300の概要 (9)

- ファブリ・ペロー共振器 -



● ファブリ・ペロー共振器

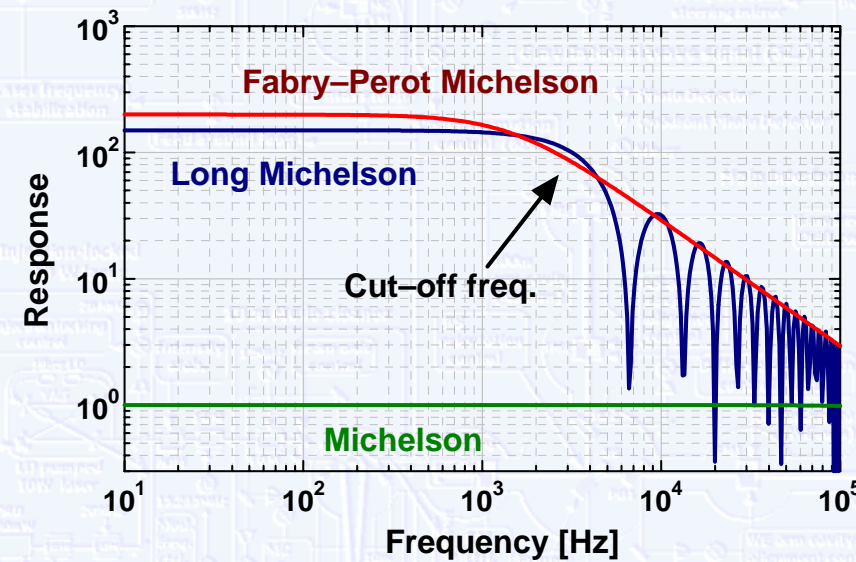
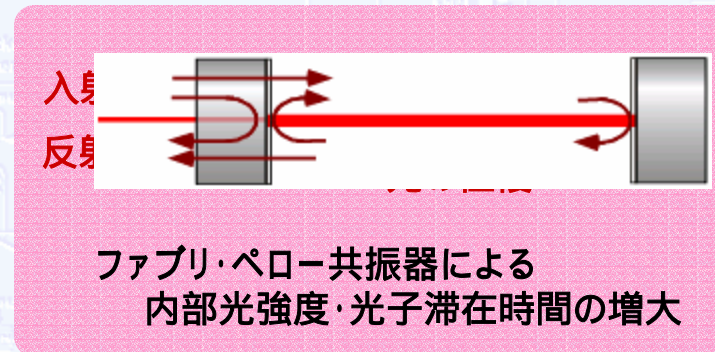
2枚の鏡の間で光を往復させる

(入射光と、往復した光の
位相を揃える)



● 感度の向上

- 実効的な基線長を伸ばす
(光の滞在時間を伸ばし、
重力波の効果を積分)
- 実効的な光強度を増加させる
(重力波による信号成分を増加)



TAMA300の概要 (10)

- パワーリサイクリング -



● パワーリサイクリング

干渉計内の光強度を増加させる

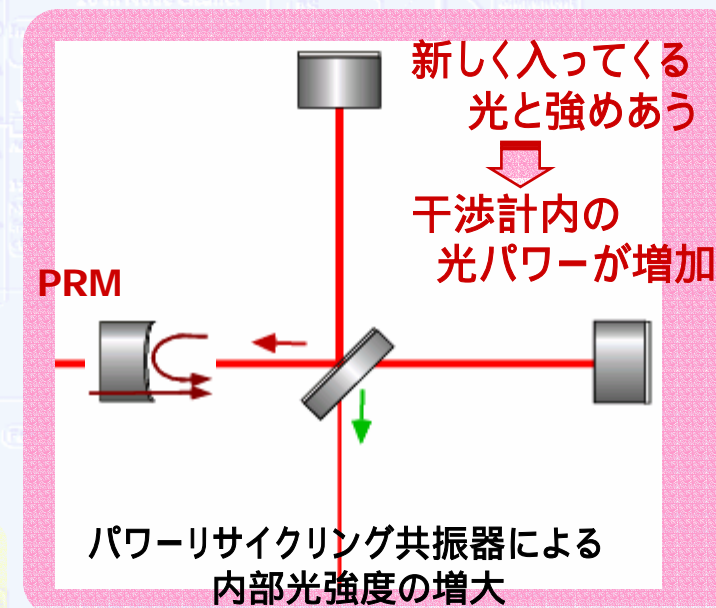
- 干渉計 検出器側で暗縞に干渉
- ほとんど全ての光は光源側に反射される
- その光を干渉計にうち返す

(入射光と、往復した光の
位相を揃える)



● 感度の向上

- 実効的な光強度を増加させる
(重力波による信号成分を増加させる)



目次



3. TAMA300の要素技術

各種の雑音の低減
(熱雑音、地面振動、レーザー光源の雑音)
制御

TAMA300の要素技術 (1)

- 感度の向上 -



● 干渉計型重力波検出器の感度限界

● 地面振動

地面の振動が鏡を揺らす影響

➡ 防振装置、長基線長、静かなサイト

● 熱雑音 (鏡の熱雑音・振り子の熱雑音)

鏡やその支持系の熱振動

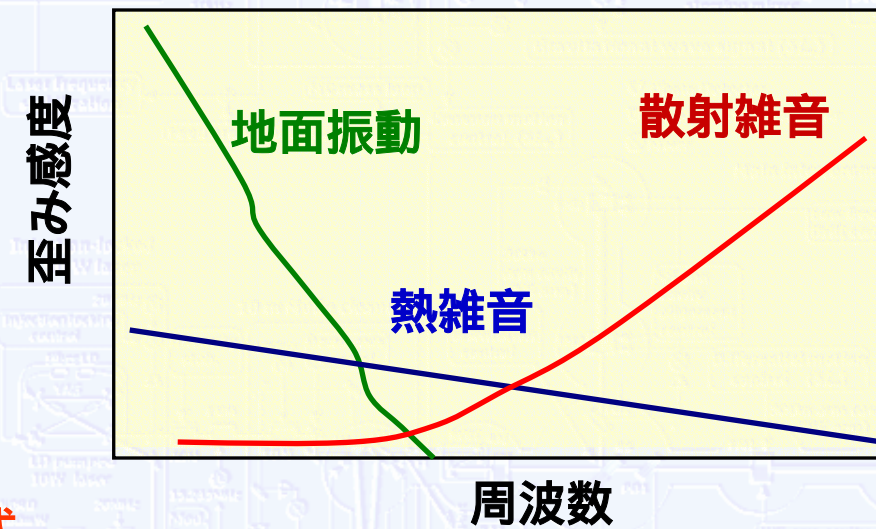
➡ 高いQ値、鏡などの冷却、長基線長

● 量子雑音 (散乱雑音・輻射圧雑音)

レーザー光が光子の集合
であることに起因する雑音

➡ 高出力レーザー、干渉計方式

干渉計型重力波検出器の感度限界



TAMA300の要素技術 (2)

- 熱雑音の基礎 -



● 熱雑音

鏡や振り子が有限温度の熱浴に接している事によって生じる振動

機械的振動 調和振動子

運動方程式 (ランジュバン方程式)

$$m\ddot{x} + \gamma\dot{x} + kx = f_n$$

熱揺動力

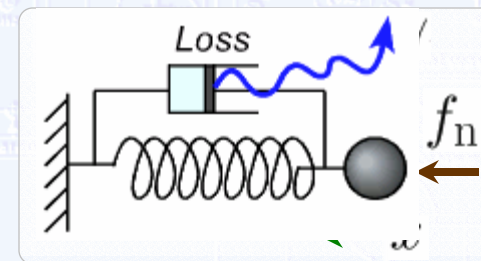
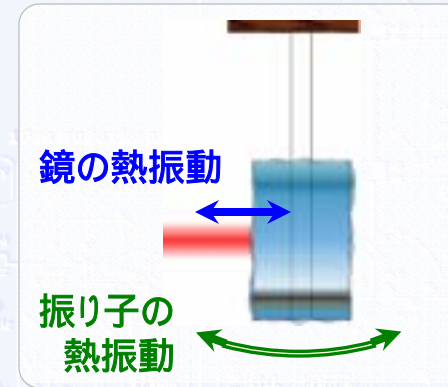
機械損失と関係
(揺動散逸定理)

$$\langle f_n^2 \rangle = 2 k_B \gamma T \quad (\text{白色雑音})$$

$$\gamma = \frac{m\omega_0}{Q}$$

変動のスペクトル $\propto \sqrt{\frac{T}{Q}}$

損失を低減する (Q値を上げる), 温度を低減する



TAMA300の要素技術 (3)

- 材質の機械損失 -



● 材質の機械損失

鏡の熱雑音, 振り子の熱雑音に影響

材質内部の機械損失

Q値の高い材質を選択

現在稼動中の干渉計

鏡 : 熔融石英, Q値 $10^6 - 3 \times 10^7$

振り子 : スチール線 など

TAMA 鏡 : 熔融石英, $Q \sim 3 \times 10^6$

振り子 : タングステン, $Q \sim 5 \times 10^5$

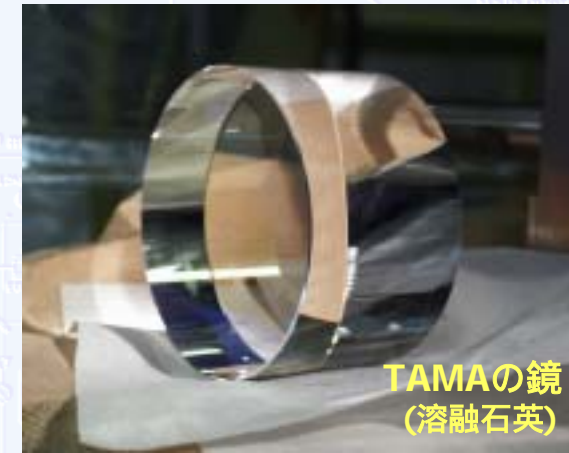
支持装置 : 高いQ値を保つ工夫

鏡としての高い性能

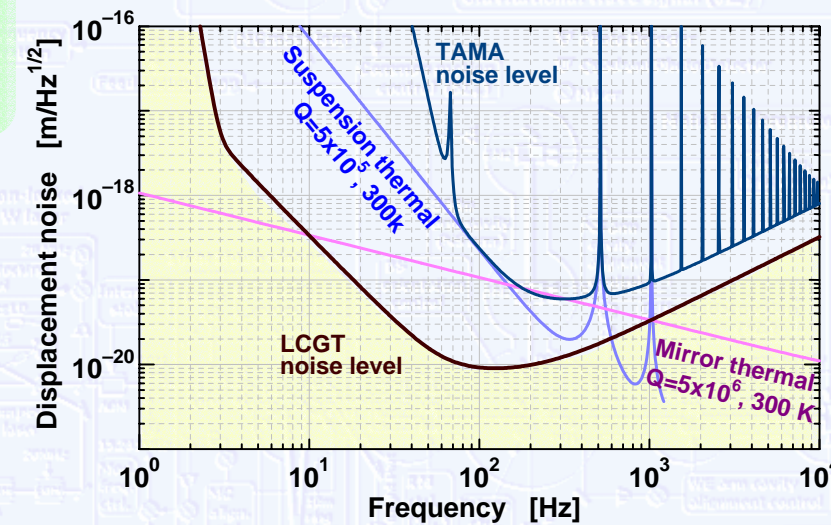
誘電体多層膜コーティング

形状誤差 $< \lambda/40$

表面粗さ $< 1\text{Å}$



TAMAの鏡
(熔融石英)



TAMA300の要素技術 (4)

- 地面振動の影響と防振 -



● 地面振動

常微動：地面は、地震等がなくても常に振動
(場所に依存するが、数 μm 程度の振動)



地上の検出器の感度を低周波数帯で制限

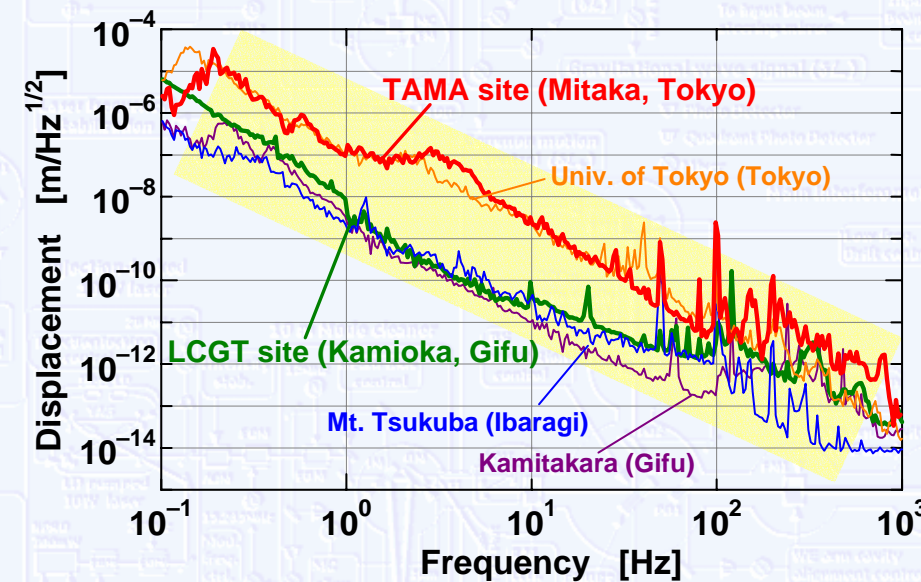
スペクトル：高周波数で低減

観測周波数帯	検出器の雑音
低周波数帯	安定動作の妨げ

振動レベルは地域によって違う

影響を低減するためには ...

- 干渉計の基線長を長くする
- 静かな場所に検出器を設置する
- 良い防振装置を組み込む



TAMA300の要素技術 (5)

- 受動防振装置 -



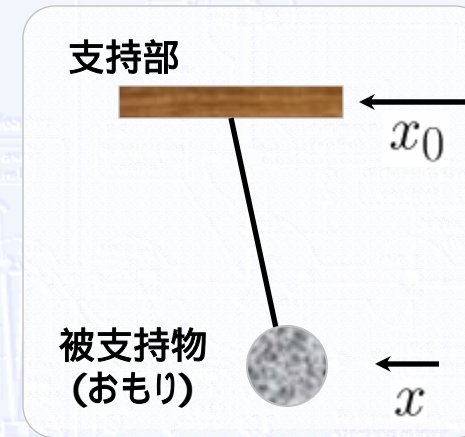
- 受動防振装置 (外部からのエネルギー供給を必要としない)

➡ バネや振り子で支持されたもの

基本構成：1段振り子

防振比：支持部と被支持物の変動比

(支持部から被支持物への伝達関数)



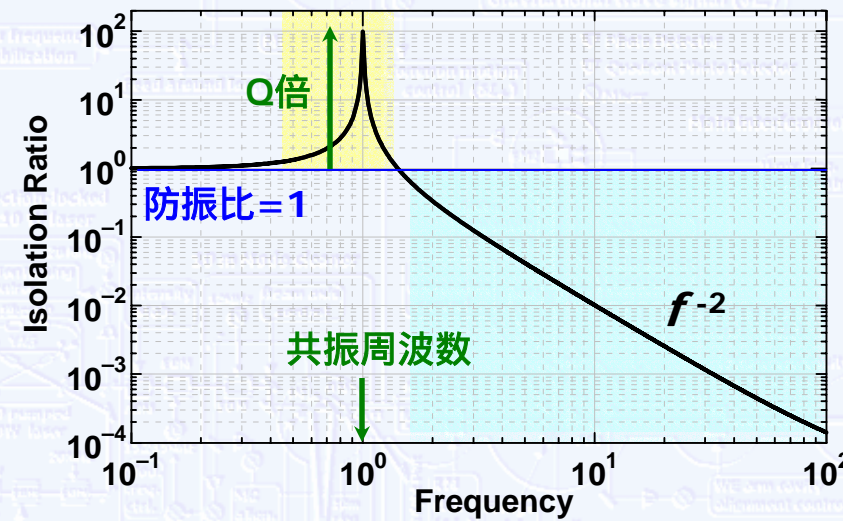
$$\frac{x}{x_0} = \frac{1 + \frac{i}{Q} \frac{f}{f_0}}{1 + \frac{i}{Q} \frac{f}{f_0} - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}$$

f : 周波数

f_0 : 共振周波数

Q : Q値 (共振の鋭さ)

共振周波数より
高い周波数帯で防振効果



TAMA300の要素技術 (6)

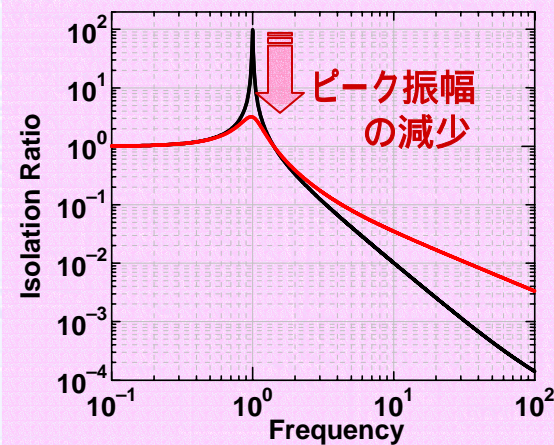
- 防振装置の高性能化 -



- より良い防振装置の実現
防振比の向上、安定動作

ダンピング

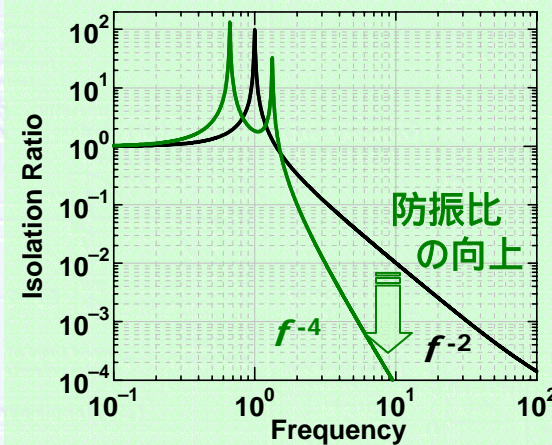
共振周波数のQ値を下げる
安定度の向上



防振性能は低下する

多段化

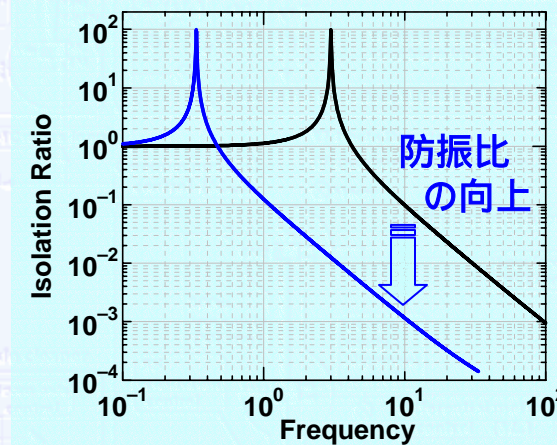
より急峻な防振比特性
防振比の向上



共振のピークが増える

低共振周波数化

共振周波数を下げる
防振比の向上



温度などのドリフトに弱くなる

これらの要素をいかに組み合わせるかが大事

TAMA300の要素技術 (7)

- TAMAの防振装置 -



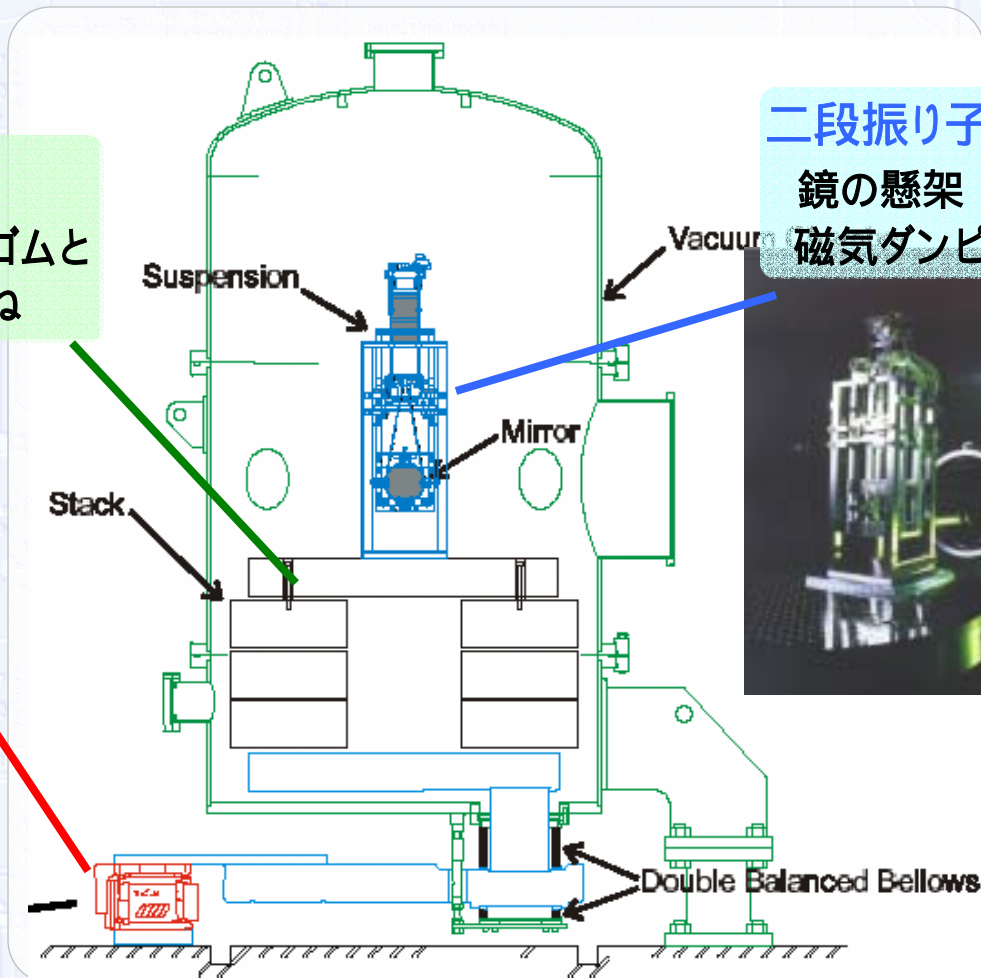
● TAMAの防振装置

三段スタック

ベローズに封入されたゴムと
金属ブロックの積み重ね

能動防振装置

空気ばねと
加速度計を使用



二段振り子

鏡の懸架
磁気ダンピング



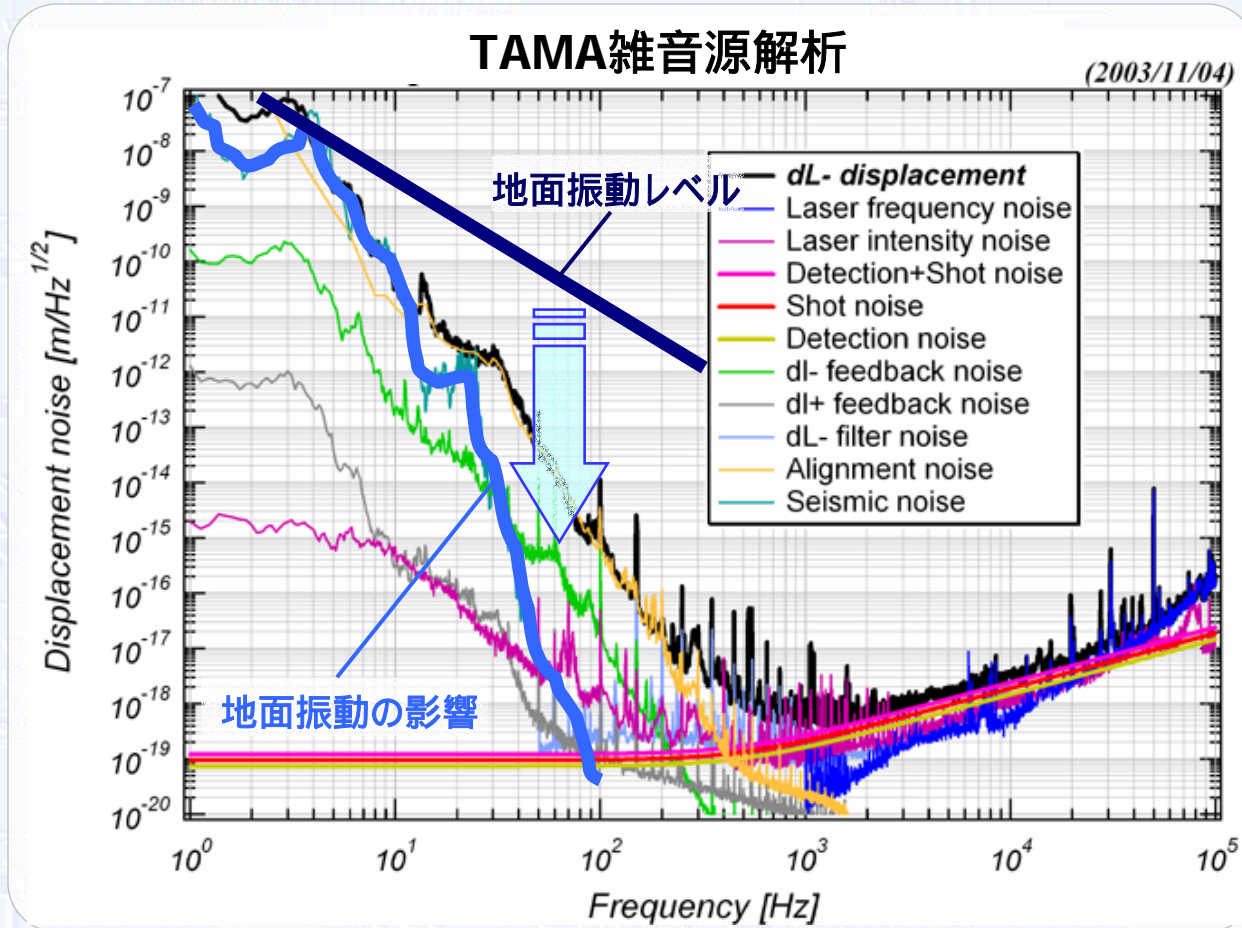
TAMA300の要素技術 (8)

- レーザ光源に起因する雑音 -



● 防振装置の効果

地面振動の影響
↓
30Hz以上では
十分に除去



TAMA300の要素技術 (9)

- レーザー光源 -



● レーザー光源

干渉計の光源としては ...

高出力 : 散射雑音レベルを下げるため

低雑音 : 周波数雑音、強度雑音が小さい

高安定 : 長期観測に耐える安定度

が必要



注入同期型Nd:YAGレーザー

波長 : 1064nm, 出力 : 10W

マスターレーザー :

半導体レーザー励起Nd:YAGレーザー

出力 700mW, NPRO

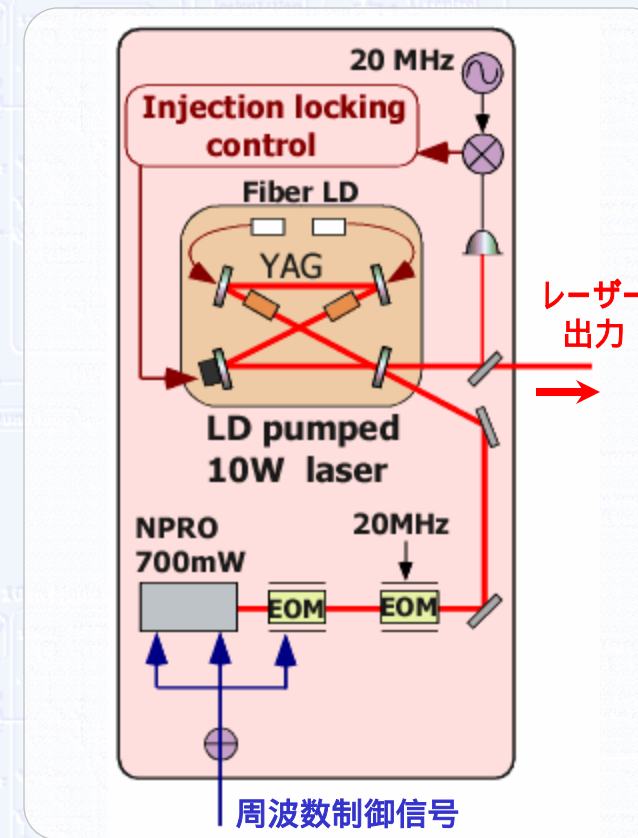
外部信号を用いて周波数安定化

スレーブレーザー :

ファイバカップル半導体レーザー励起

出力 10W

マスターレーザーに位相同期



TAMA300の要素技術 (10)

- 周波数安定化制御 -



● 周波数安定化

腕の光路長差などとカップル

8桁程度の安定化が必要

フリーラン $100 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$

安定化後 $10^{-6} \text{ Hz/Hz}^{1/2}$

最終的には主干涉計が基準に制御

最も安定な基準, 干涉計との相対安定度

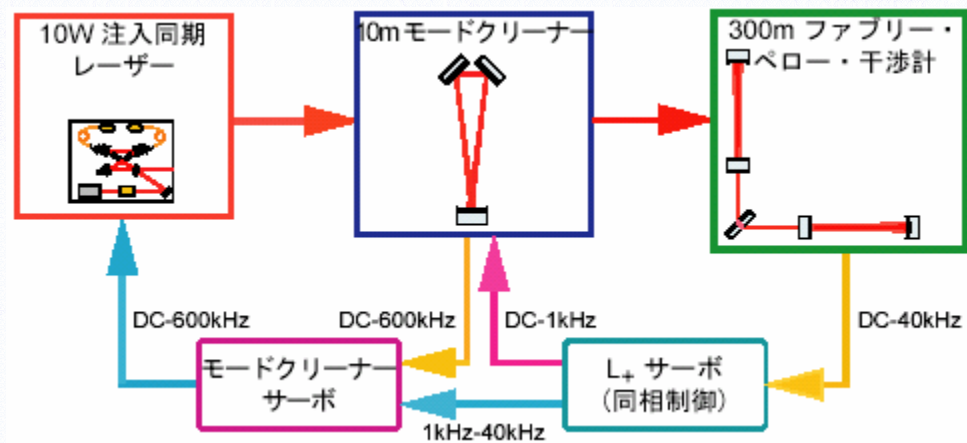
歪み感度-変位雑音-周波数雑音

$$\Delta h = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta f}{f}$$

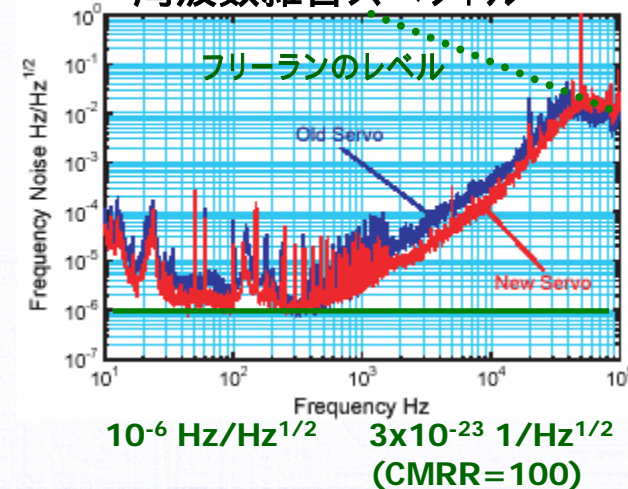
L : 基線長

f : 光源の周波数 (YAG ~ 300THz)

TAMA (モードクリーナ、干涉計の多段制御)



周波数雑音スペクトル



TAMA300の要素技術 (11)

- 安定化制御 -



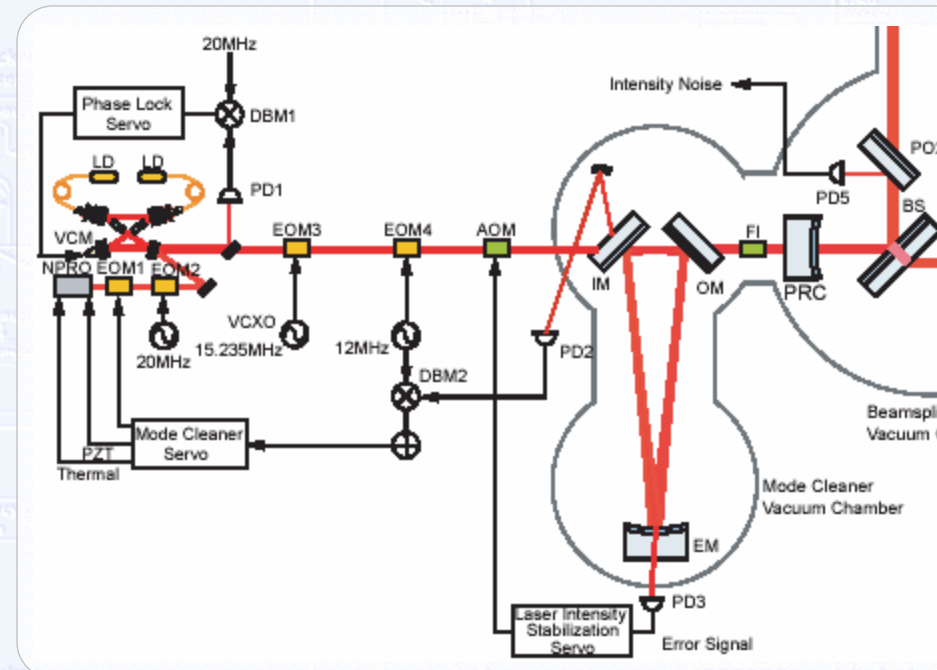
● 強度安定化

2-3桁程度の安定化が必要

$10^{-8} 1/\text{Hz}^{1/2}$ 程度の安定度

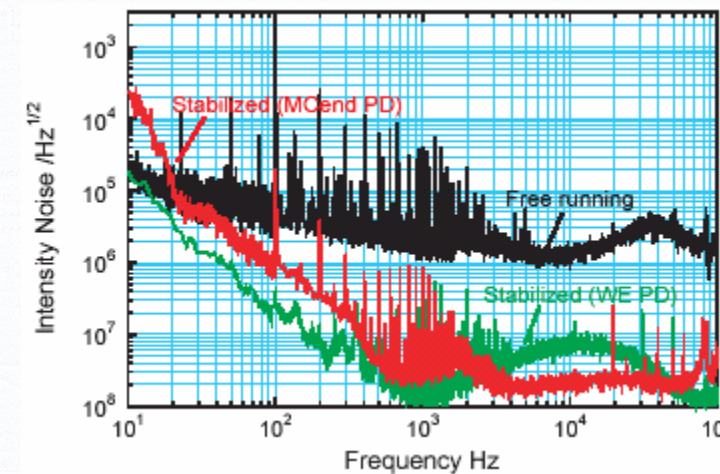
PDで強度を検出 フィードバック制御

最終的には,PD入射光の散光雑音で安定度が制限



TAMA

モードクリーナ透過光を用いて制御



TAMA300の要素技術 (12)

- レーザー光源に起因する雑音 -



● レーザー光源に起因する雑音

理想的な場合 問題無いはず

(両腕に同相で働く 差動信号には出ない)

干涉計の非対称性とカップル 雑音

周波数雑音, 強度雑音,
不要な光成分による雑音



レーザー光源に課せられる要求

高出力: 量子雑音を低減するため

低雑音: 不要な雑音の混入を排除

長期安定: 長期観測に耐え得る



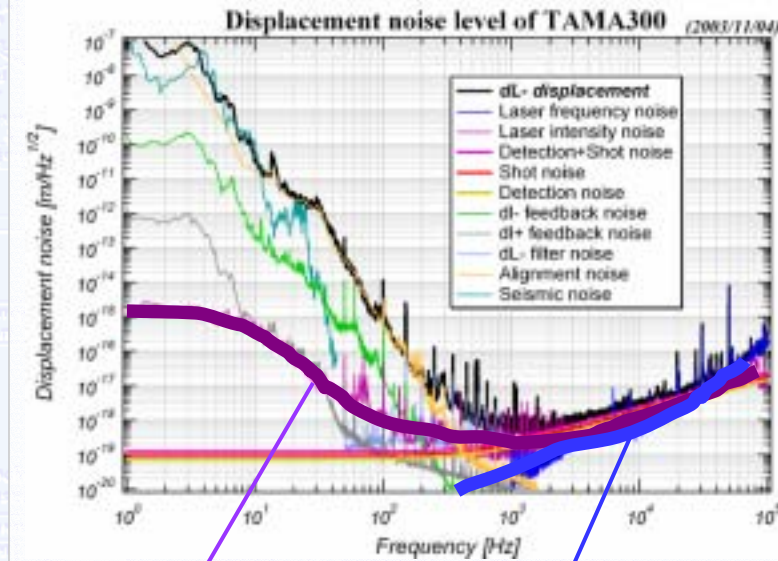
比較的 low 出力で高安定のレーザー光源と

高出力のレーザー光源を組み合わせ使用

マスターレーザー光源, 注入同期の組み合わせ

安定化制御 (周波数安定化, 強度安定化)

TAMA雑音源解析



レーザー強度雑音

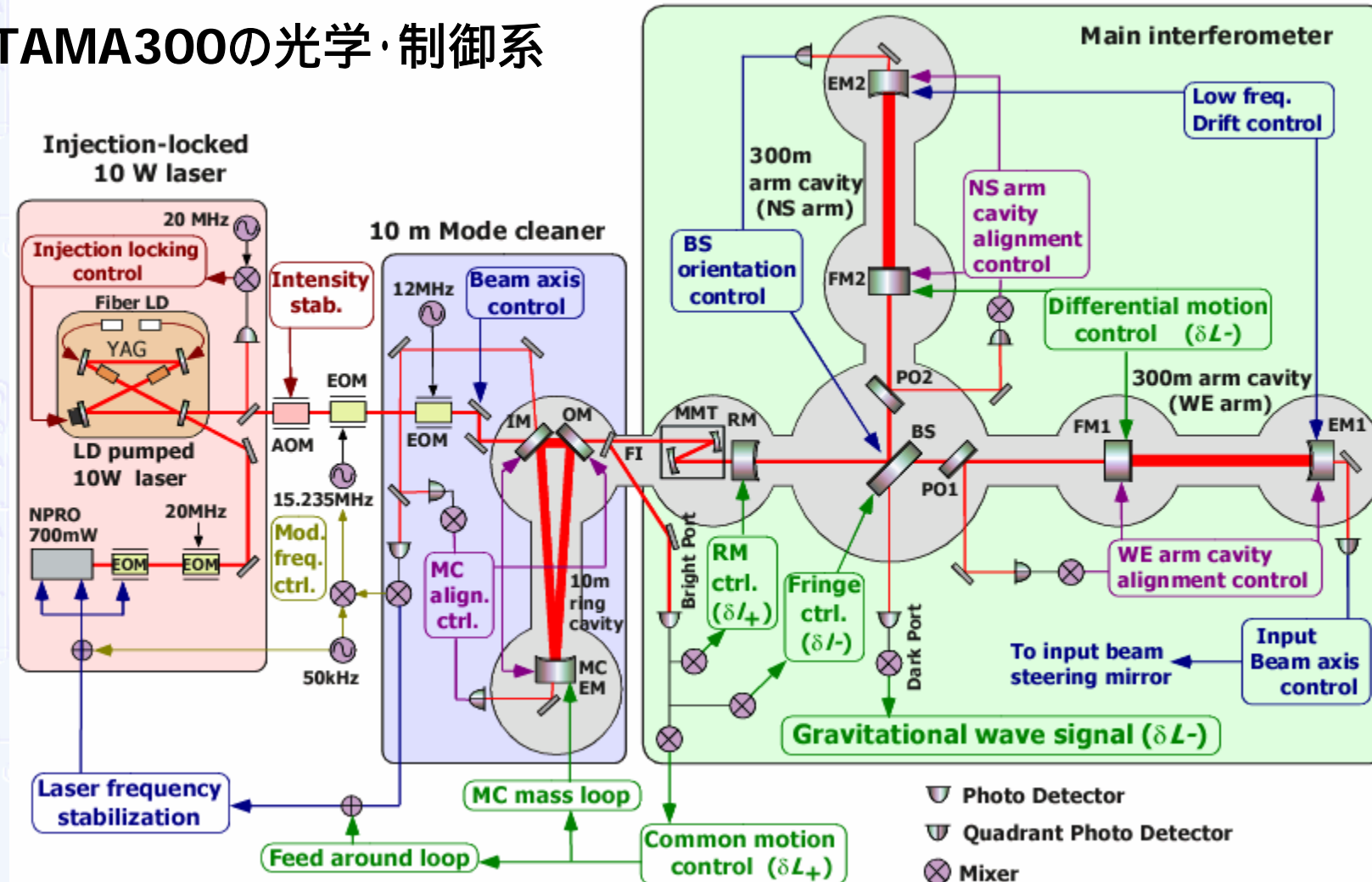
レーザー周波数雑音

TAMA300の要素技術 (13)

- 干渉計全体の制御 -



● TAMA300の光学・制御系



TAMA300の要素技術 (14)

- 制御による抑圧 -



● 制御による外乱の抑圧

干渉計を動作点に保つためには不可欠

単純な1自由度のフィードバック制御系

$$x = x_0 - G \cdot x$$

x : 抑圧後の変動量

x_0 : 制御系が無い時の変動量

G : 制御ゲイン (オープンループ伝達関数)

$$\Rightarrow x = \frac{1}{1 + G} \cdot x_0$$

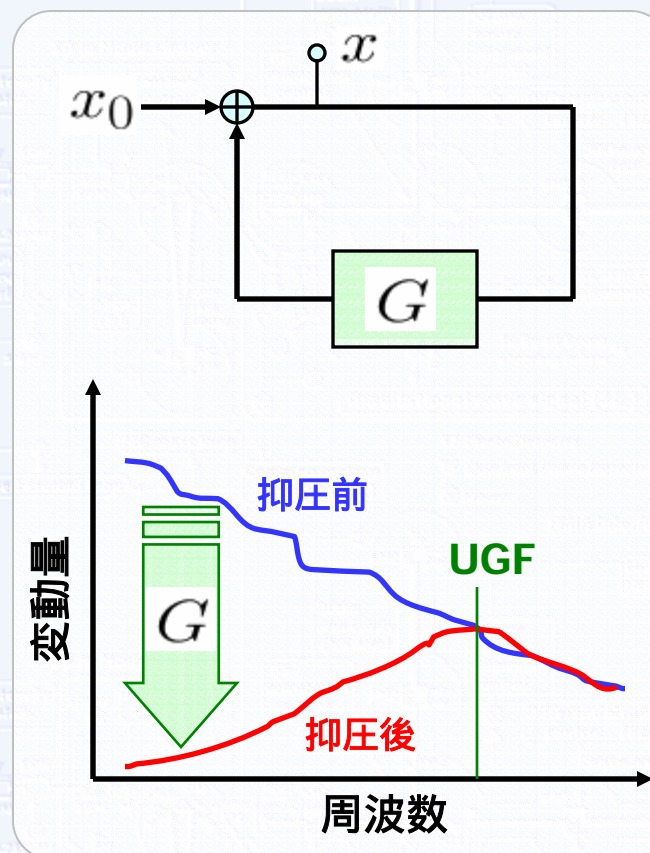
抑圧比

制御ゲインが大きい

安定, 残留変動が小さい

$G=1$ となる周波数

: **Unity Gain Freq.** 制御帯域



TAMA300の要素技術 (15)

- 重力波ポート信号による制御 -



● 制御による重力波信号への影響

制御によって重力波信号も抑圧されてしまう？



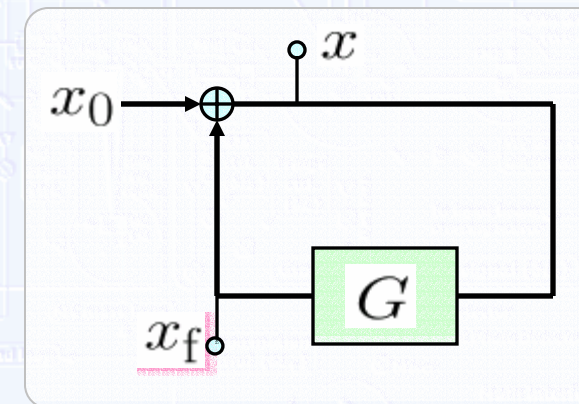
信号は取得できる

制御帯域 < 観測周波数帯

観測帯域では制御は無関係

制御帯域 > 観測周波数帯 (望ましい)

フィードバック信号から取得



$$x_f = G \cdot x = \frac{G}{1 + G} \cdot x_0$$

変動は抑圧されるが、

**‘どれだけ変動しようとしたか’
の信号は取得できる**

ただし ...

重力波信号が現れる自由度の信号
を用いて重力波変動の自由度
を制御している事が必須

TAMA300の要素技術 (16)

- 他の自由度の制御 -

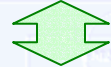


●他の自由度の制御

干渉計の他の自由度 (光路長・角度・その他) の制御も大事

動作を安定にする

広い制御帯域, 大きな制御ゲイン



余分な雑音を導入しない

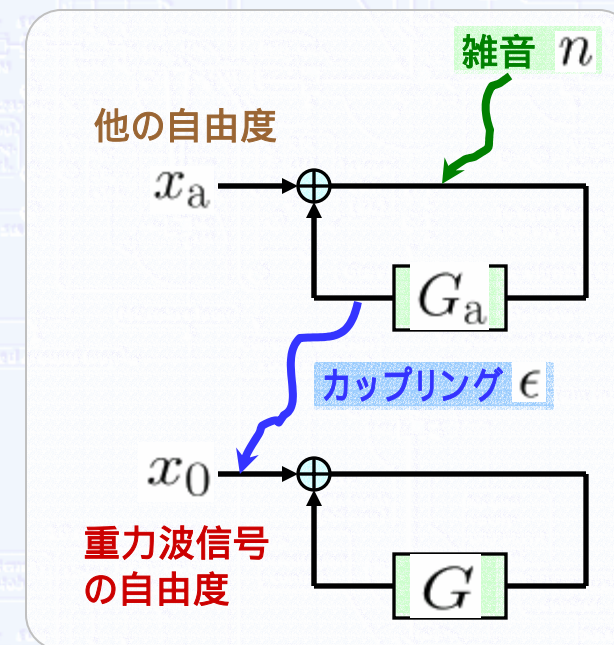
狭い制御帯域

他の自由度の変動からの雑音の混入
(混入の経路は様々
...)

$$x_n = \epsilon \cdot \frac{G_a}{1 + G_a} \cdot n$$

対策:

雑音を低減, カップリングを低減,
制御帯域を制限



目次



4. 観測とデータ解析

TAMAの観測運転 データ解析結果

観測とデータ解析 (1)

- TAMA300の観測運転 -



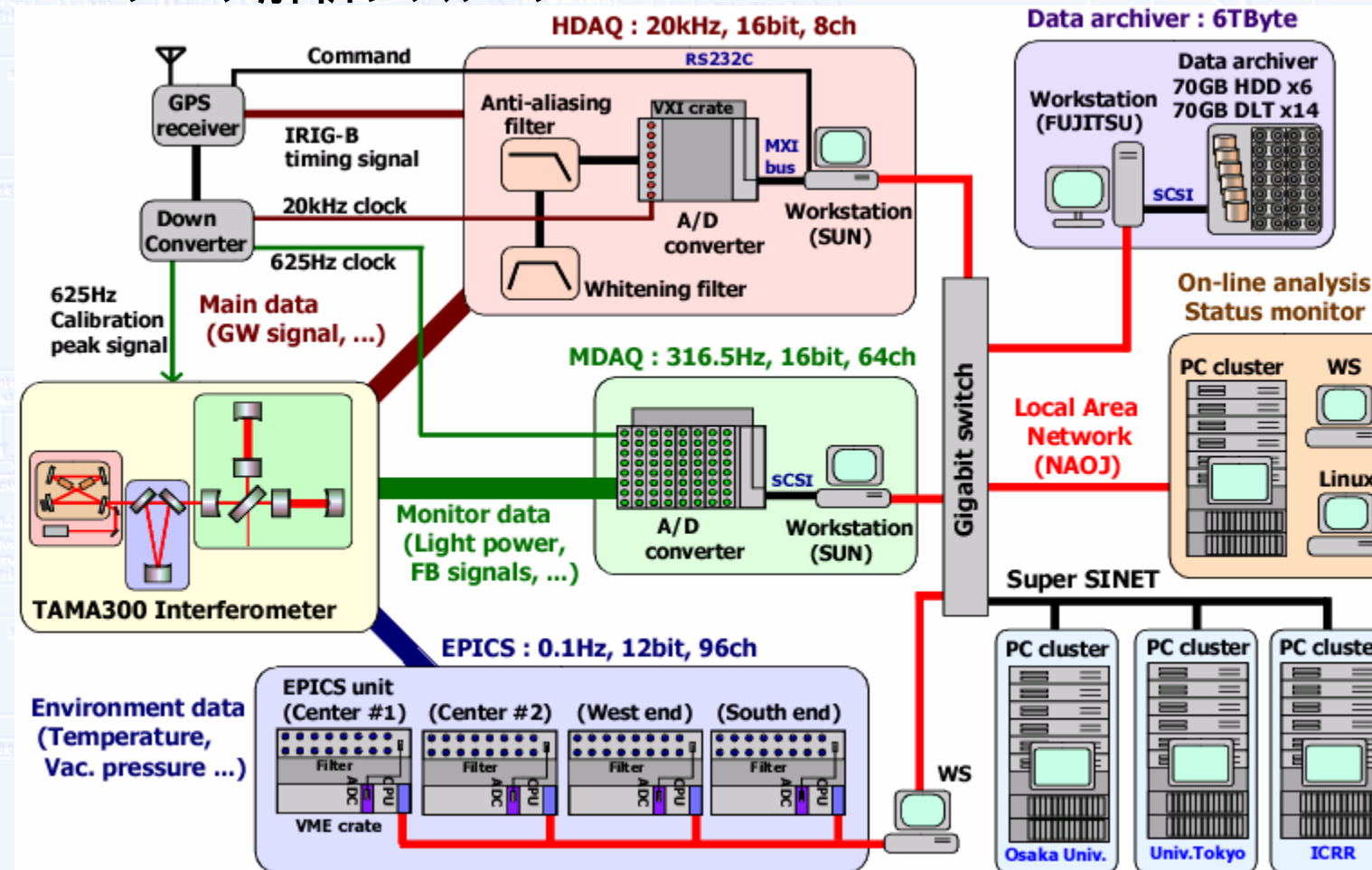
	Data Taking	Objective	Observation time	Typical strain noise level	Total data (Longest lock)
DT1	August, 1999	Calibration test	1 night	$3 \times 10^{-19} / \text{Hz}^{1/2}$	10 hours (7.7 hours)
DT2	September, 1999	First Observation run	3 nights	$3 \times 10^{-20} / \text{Hz}^{1/2}$	31 hours
DT3	April, 2000	Observation with improved sensitivity	3 nights	$1 \times 10^{-20} / \text{Hz}^{1/2}$	13 hours
DT4	Aug.-Sept., 2000	100 hours' observation data	2 weeks (night-time operation)	$1 \times 10^{-20} / \text{Hz}^{1/2}$ (typical)	167 hours (12.8 hours)
DT5	March, 2001	100 hours' observation with high duty cycle	1 week (whole-day operation)	$1.7 \times 10^{-20} / \text{Hz}^{1/2}$ (LF improvement)	111 hours
DT6	Aug.-Sept., 2001	1000 hours' observation data	50 days	$5 \times 10^{-21} / \text{Hz}^{1/2}$	1038 hours (22.0 hours)
DT7	Aug.-Sept., 2002	Full operation with Power recycling	2 days		25 hours
DT8	Feb.-April., 2003	1000 hours Coincidence	2 months	$3 \times 10^{-21} / \text{Hz}^{1/2}$	1157 hours (20.5 hours)
DT9	Nov. 2003 - Jan., 2004	Automatic operation	6 weeks	$1.5 \times 10^{-21} / \text{Hz}^{1/2}$	500 hours

観測とデータ解析 (2)

— データの取得と転送 —



● TAMAデータ解析システム



観測とデータ解析 (3)

- Data Taking 8 -



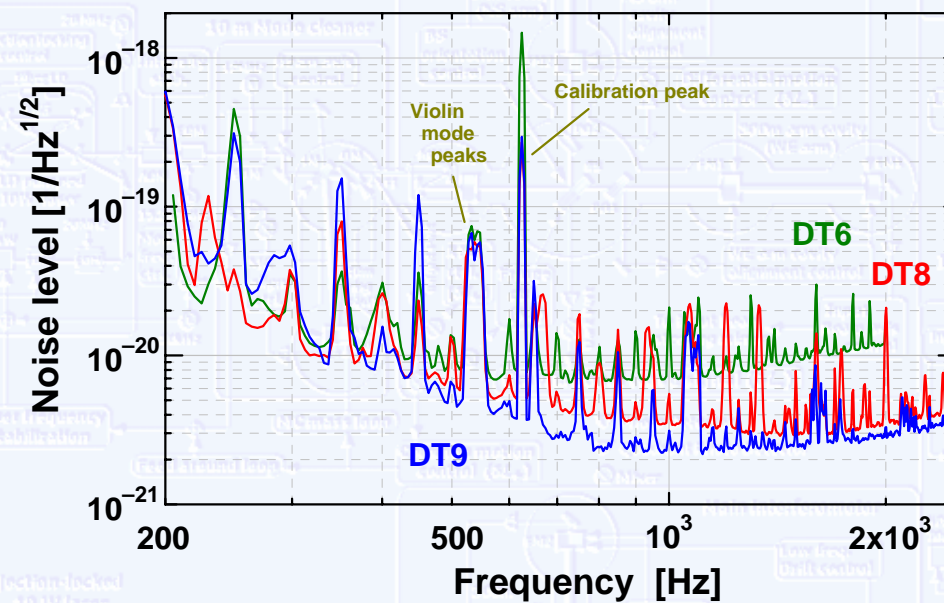
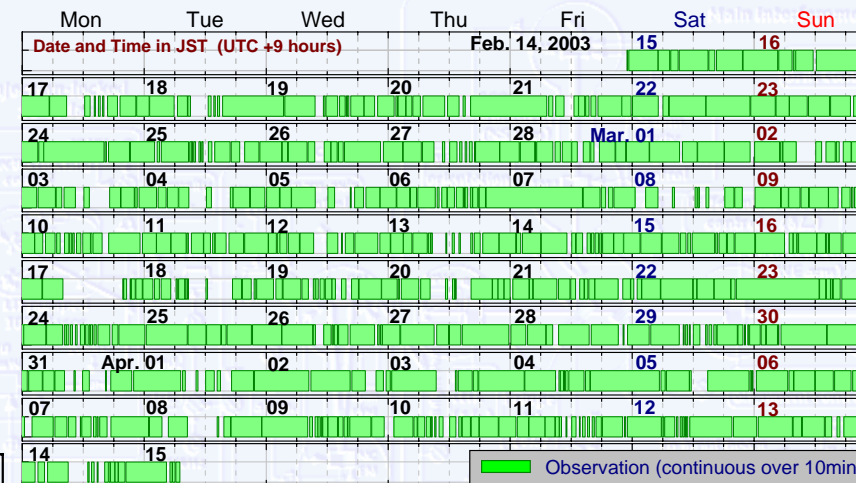
● Data Taking 8

Feb.14 – April 14, 2003

(2ヶ月間の観測, 94人がシフトに参加)

観測時間 : 1157 hours

Duty Cycle : 81%



典型的なノイズレベル

DT6: $7 \times 10^{-21} / \text{Hz}^{1/2}$ @ 800Hz

DT8: $3 \times 10^{-21} / \text{Hz}^{1/2}$ @ 1.3kHz

DT9: $2 \times 10^{-21} / \text{Hz}^{1/2}$ @ 900Hz

観測とデータ解析 (4)

- 観測レンジ -



観測レンジ

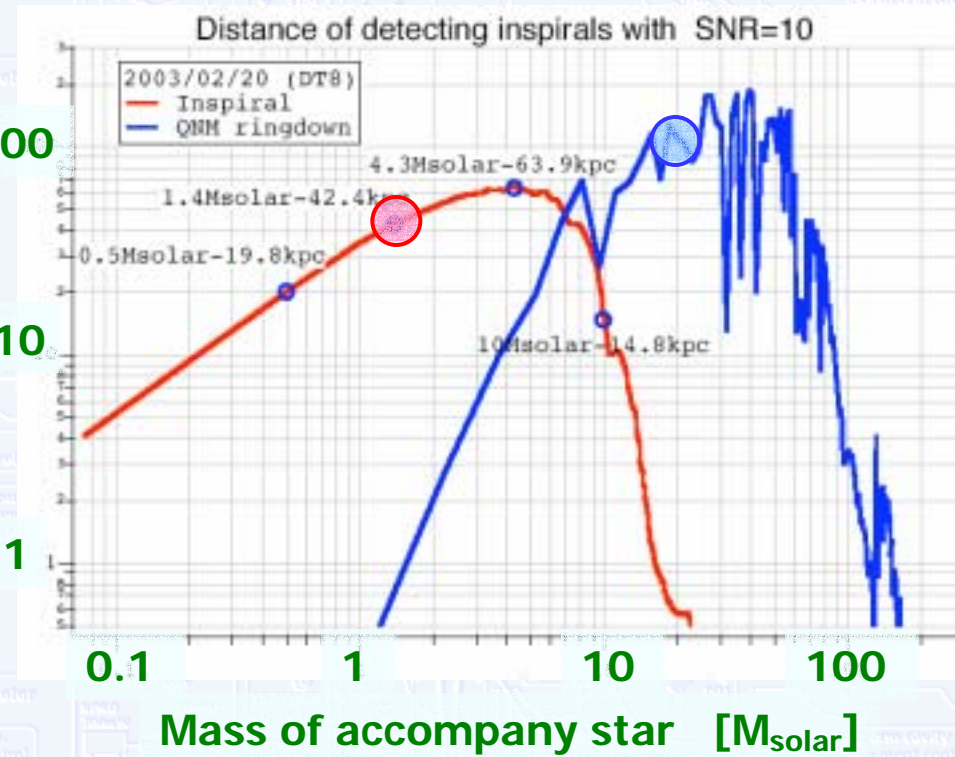
SNR 10で、どの距離まで観測可能かを表す

連星合体 : 42kpc
($1.4M_{\odot}$ 中性子星連星)
ブラックホール
リングダウン : 100kpc
($20M_{\odot}$ BH)



銀河系内イベントがあれば
十分観測可能

Detectable distance [kpc]



観測とデータ解析 (5)

- 得られたデータの解析 -



データ解析

チャープ重力波

- **ポストニュートニアン近似によって波形が正確に予測できる**
- **観測初期より解析が進められている**

バースト重力波

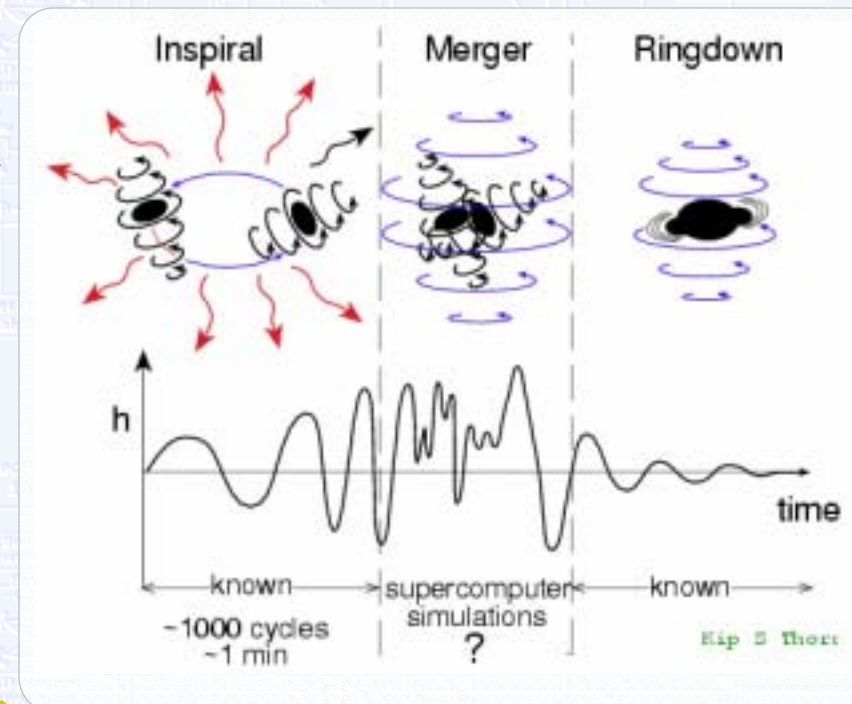
- **連星合体時・超新星爆発からの重力波**
- **正確な波形が予測できない**
→ **非定常雑音と信号の区別が重要**

ブラックホールのリングダウン

- **ブラックホール形成直後の準固有振動**
- **質量とKarrパラメータで波形が決まる**

連続重力波

- **パルサー・連星からの重力波**
- **長時間積分によって感度をかせぐ**
- **SN1987A残骸中のパルサー (935Hz)**



観測とデータ解析 (6)

- チャープ波解析 -



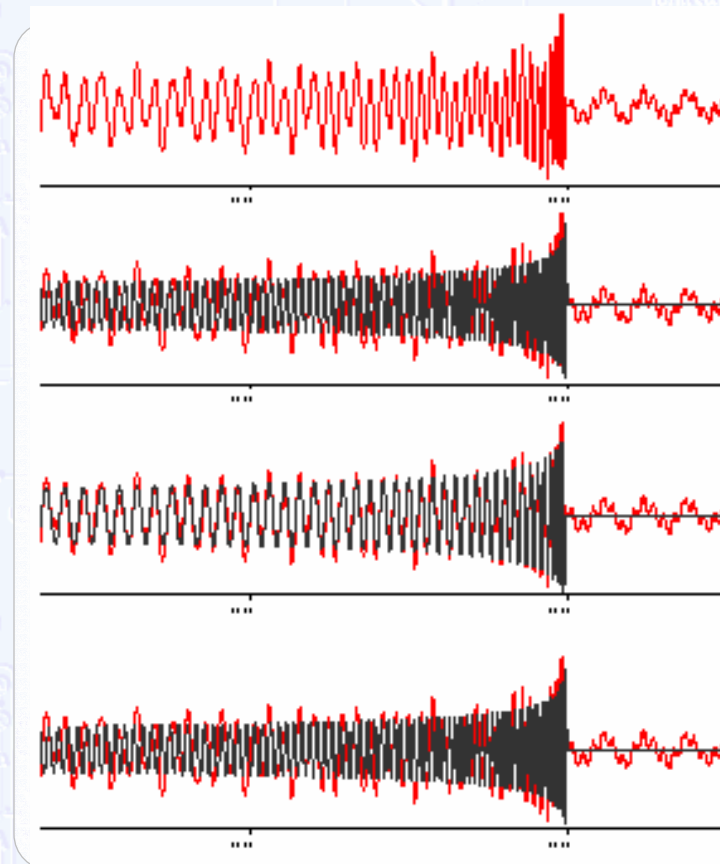
- チャープ重力波解析
 - ポストニュートニアン近似によって、正確な波形が予測できる

マッチド・フィルター解析
(Winer optimal filter)

探査する質量領域のテンプレート群を準備
予想波形との相関 → SNR

$$c(\tau) = \int_{f_1}^{f_2} \frac{\tilde{h}^*(f) \cdot \tilde{s}(f)}{\tilde{S}_h(f)} e^{-i2\pi f\tau} df$$

波形から非定常雑音の除去 (χ^2 -test)



観測とデータ解析 (7)

- チャープ波解析結果 -



- DT8 (1157時間のデータ) 解析の結果
閾値 12.5 (fake 0.8 event/yr)

→ 重力波信号無し ($1.0-3.0 M_{\text{solar}}$)



銀河イベントの上限値を与える
適当な銀河モデル(連星の分布)を仮定

→ 銀河イベントへの検出効率 $\varepsilon = 0.61$

観測結果の分布に基づいたPoisson統計

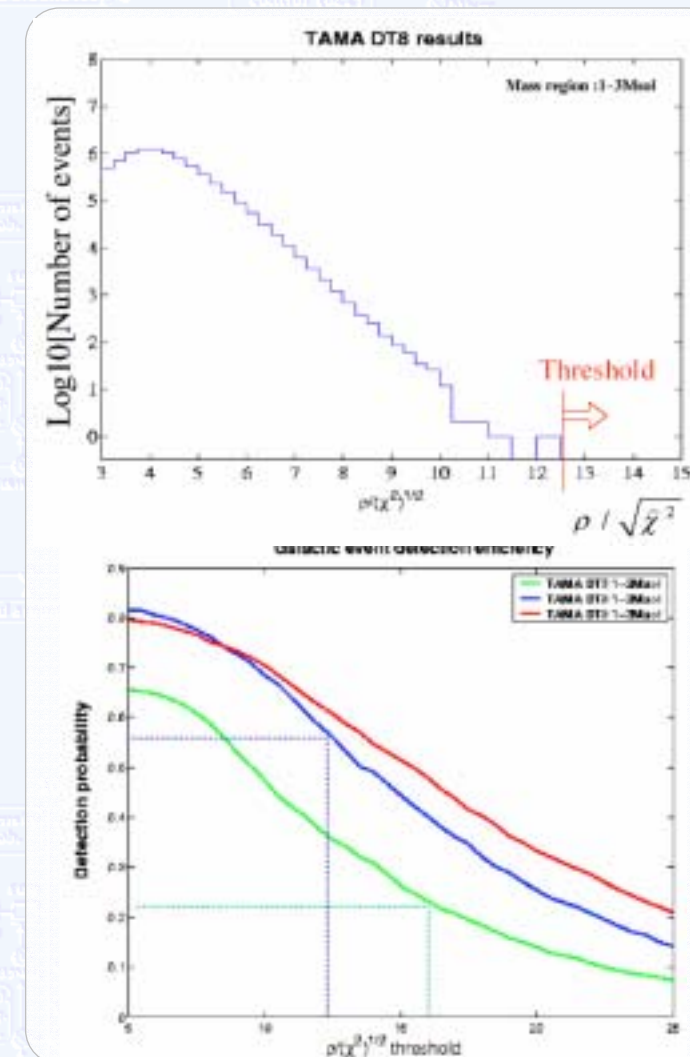
→ イベント数の上限 $N = 2.3$ (C.L. 90%)



銀河イベントの上限値

$N/T\varepsilon = 29$ events/yr (C.L. 90%)

(理論予測 10^{-4} events/yr)



観測とデータ解析 (8)

- 上限値の歴史 -



● 銀河イベントの上限値

Mark II 40m prototype IFO at Caltech (1994)

4400 events/yr

TAMA DT2 3-night obs. (1999)

5200 events/yr

TAMA DT4 2-week obs. (2000)

240 events/yr

TAMA DT6 50-day obs. (2001)

83 events/yr

LIGO S1 17-day obs., 3 detector coincidence (2002)

124 events/yr

TAMA DT8 60-day obs. (2003)

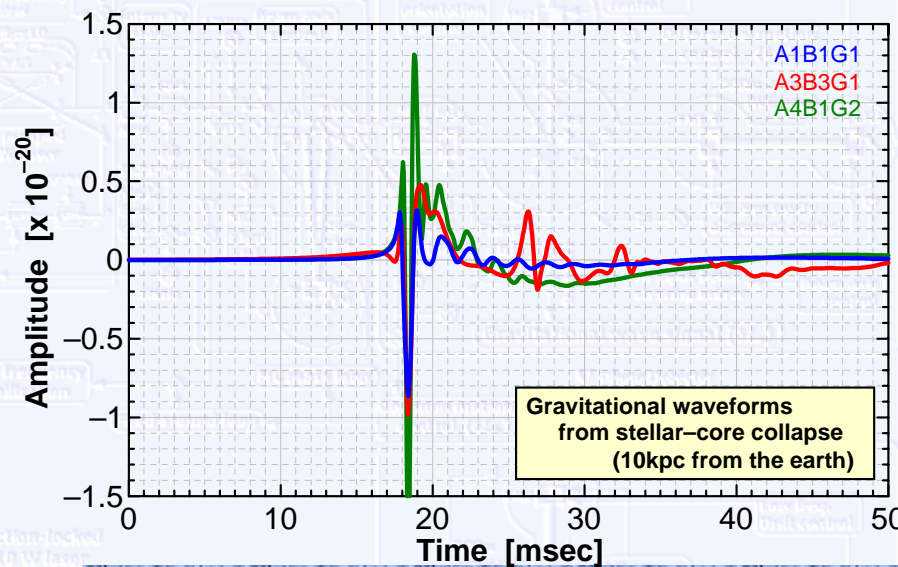
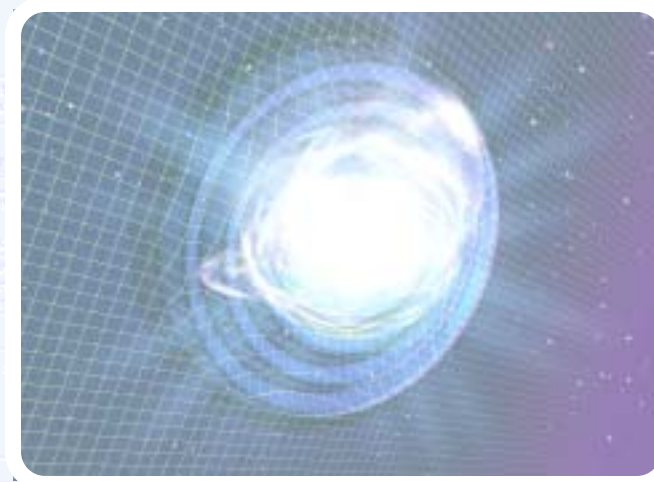
29 events/yr

観測とデータ解析 (9)

- バースト波解析 -



- バースト重力波解析
 - 数値シミュレーション ...
 - 100通り程度の波形が予測されている
 - 全ての条件は網羅されていない
- ⇒ テンプレートとしては不適
(マッチド・フィルタは使えない)



共通の特徴

: 短いバースト信号

Spike wave ~1msec

Duration time <30msec

H.Dimmelmeier et al,
Astron. Astrophys. 393 (2002) 523.

T. Zwerger, E. Müller,
Astronomy & Astrophysics, 320 (1997), 209.

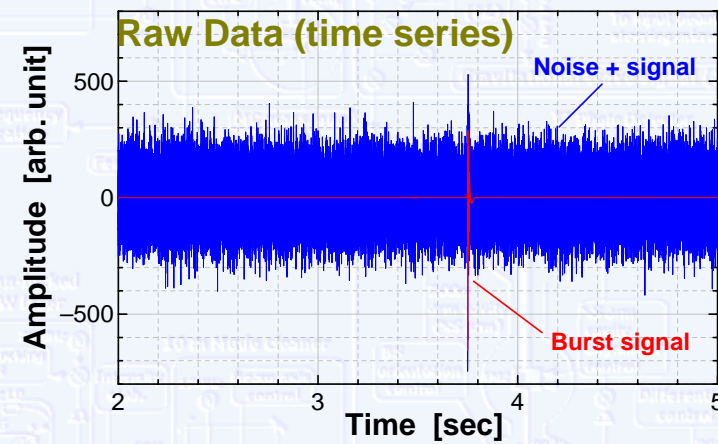
観測とデータ解析 (10)

- Excess power filter -

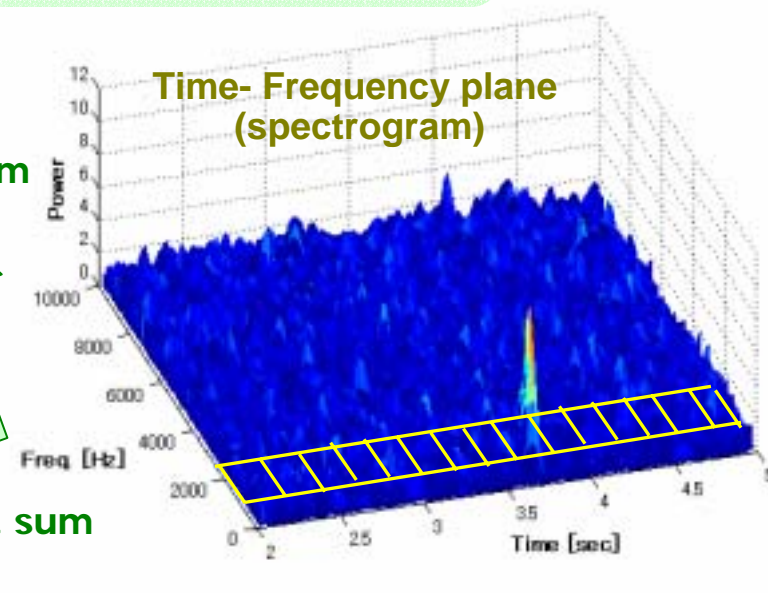


● エクセス・パワー・フィルタ

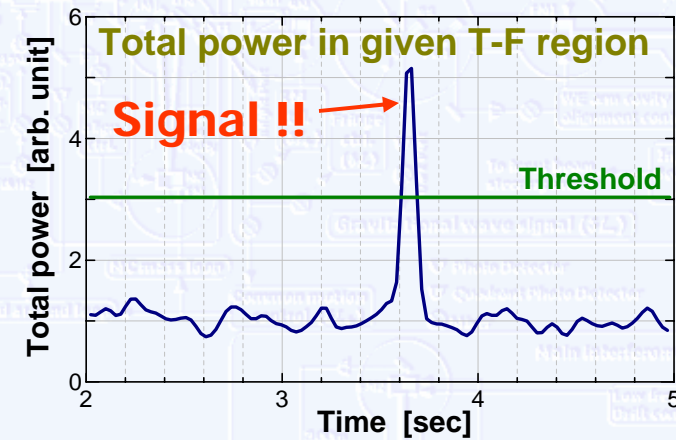
特定の時間-周波数領域
の信号パワーを評価



Spectrogram



Freq. sum



信号波形に対する仮定が少ない

波形の誤差に対してロバスト

観測とデータ解析 (11)

- バースト波のイベントレート -



● バースト波のイベントレート

$h_{\text{rms}}: 3 \times 10^{-17}$ (1msec spike)

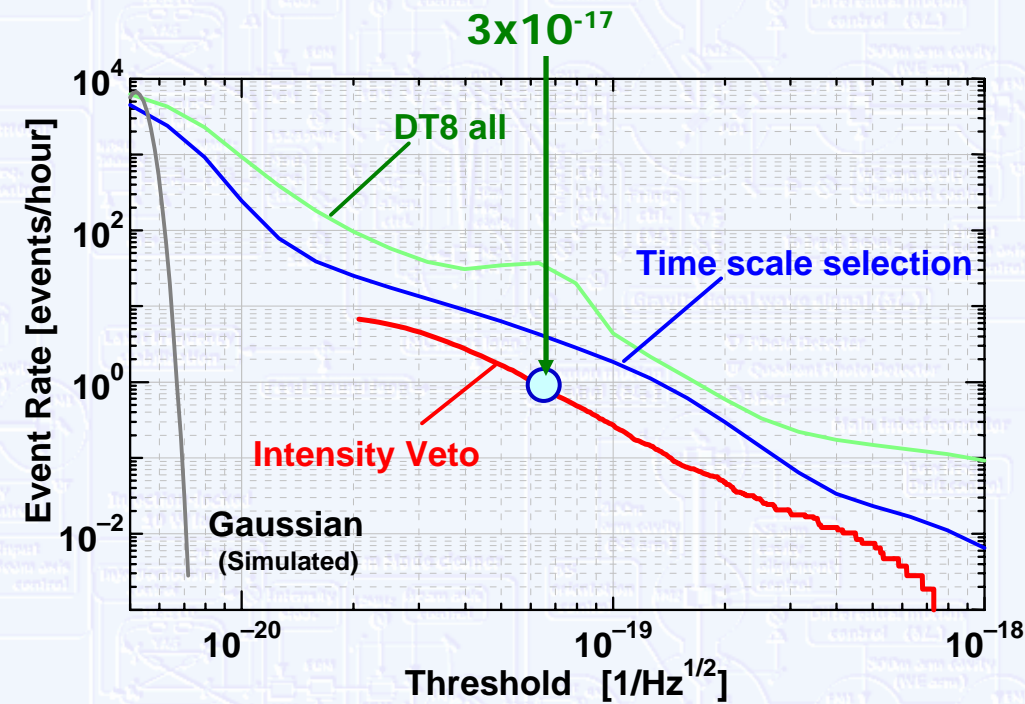
0.8 events/hour

(信号の時間スケール
他のモニタ信号による
非定常雑音除去後)

ガウス雑音による
シミュレーション結果
よりも遥かに大きい
実際のイベントとしては、非現実的
(我々の銀河系が 10^6 年で消滅)



検出器の不安定性によるフェイクイベント



観測とデータ解析 (12)

- 国際協力・同時観測 -



- 国際競争

1999年の観測開始後、

TAMAは、干渉計としては世界最高の感度と安定度を実現していた

⇒ 2002年、LIGOの感度はTAMAを超えた

- 国際協力

TAMA-LIGO(-GEO) 同時観測 (TAMA DT8, LIGO S2)

		基線長	方式	Range [kpc]	最長ロック	稼働率
LIGO	H1	4km	RFPMI	300	66.2時間	68%
	H2	2km	RFPMI	200	12.4時間	53%
	L1	4km	RFPMI	800	6.5時間	38%
GEO	G1	600m	DRMI			調整中
TAMA	T1	300m	RFPMI	42	20.5時間	81%

各種コインシデンス解析が準備中 (LIGO, ROG)

目次



5. まとめ

まとめ (1)

- TAMAの現状と今後 -



● TAMAの現状と今後

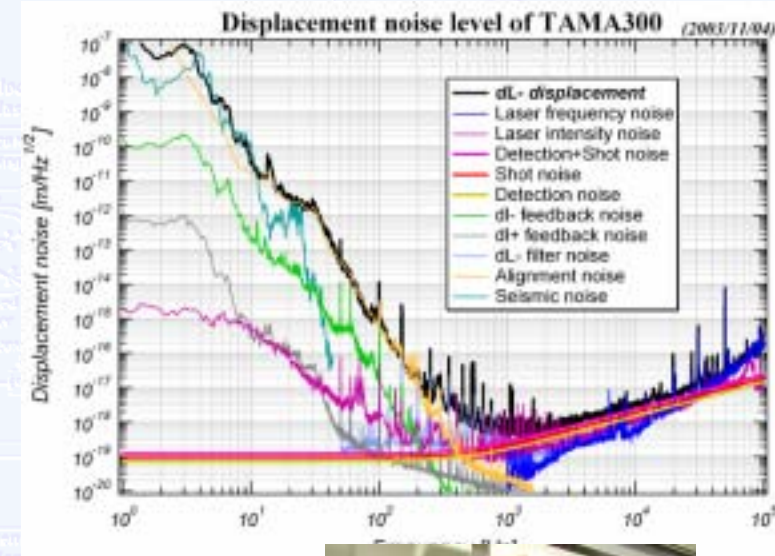
銀河系内イベントに対して十分な感度

感度限界まで少し

雑音源は、ほぼ特定されている

→ 今年一年でノイズハンティング

データ解析 (TAMA単体, 国際協力)



2006- 防振系の改良と観測運転

低周波数帯の感度の向上

安定度の向上

将来の大型検出器のためのテスト



まとめ (2)

- 重力波検出器の目標と現状 -

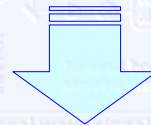


- 重力波検出によって
新たな天文学 が生まれる可能性がある



検出を目指して、研究開発が続けられている

重力波検出器の開発、観測
検出器のデータ解析

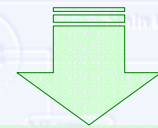


観測結果が公表されつつある

次回予告



- ◆ **新たな天文学**のためには、
現在の検出器では不十分



次世代の検出器計画と開発

地上における高感度検出器計画
宇宙空間での検出器計画

おわり



終

はじめに (4)

- 重力波源 -

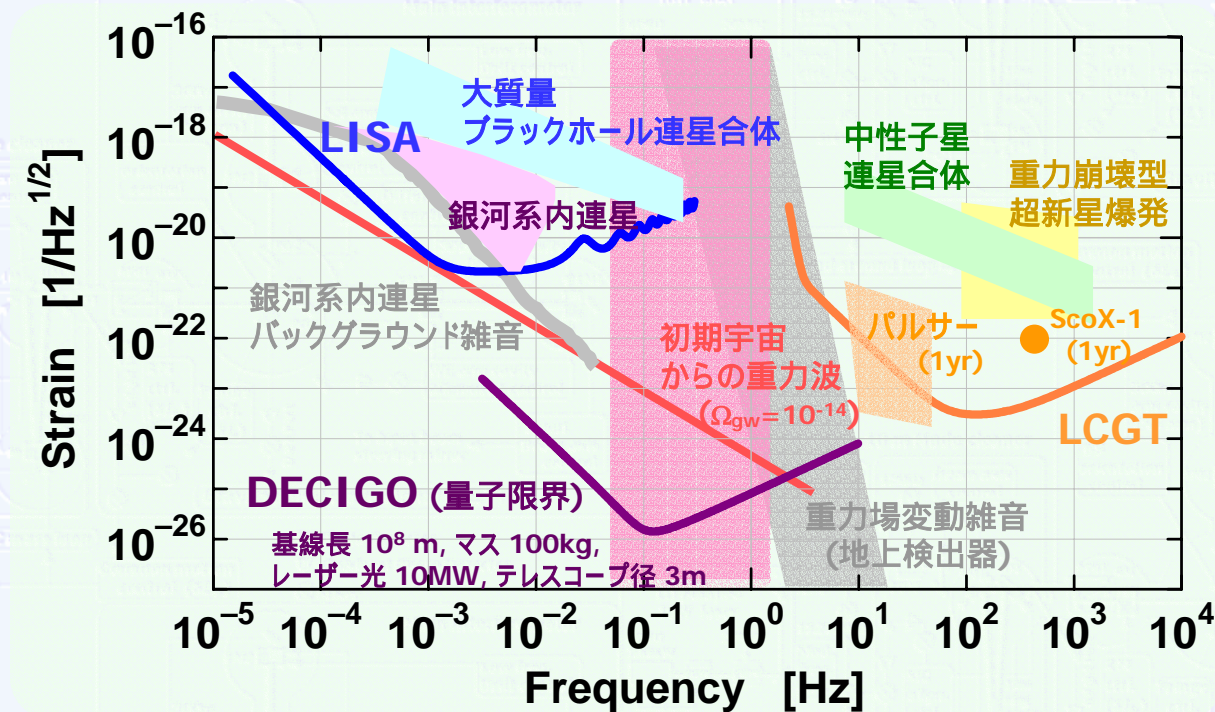


● 重力波源

大質量・コンパクトな天体の激しい運動

連星の運動・合体, 超新星爆発, 回転中性子星など

現象の時間スケールに応じた周波数の信号



II-1 地面振動 (2)

- 防振の方式 -



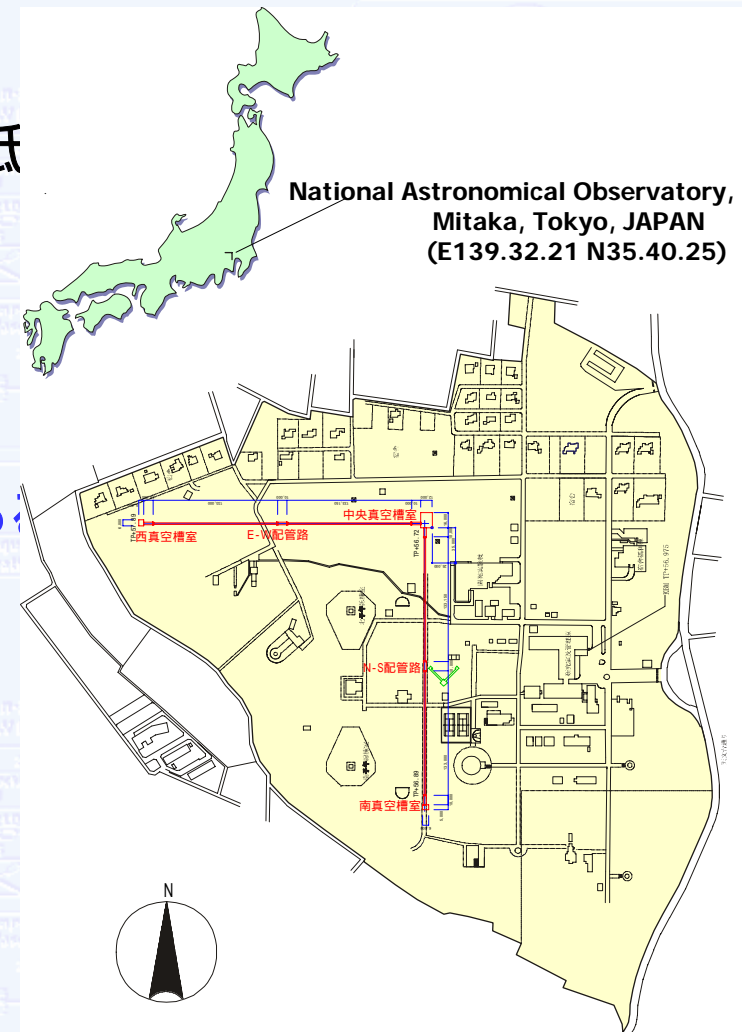
● 防振装置

干渉計の鏡を支持し、地面振動を低

2つの要請

観測周波数帯 高い防振比
低周波数帯 高い安定度

受動防振型と能動防振型があ



Non-Gaussian noise reduction (1)

- Reduction principle -



- Reduction of non-Gaussian noise noises

Time-scale selection of events candidates

Real GW bursts < 30 msec

Fake events > a few sec

- 2 statistics

- Averaged power

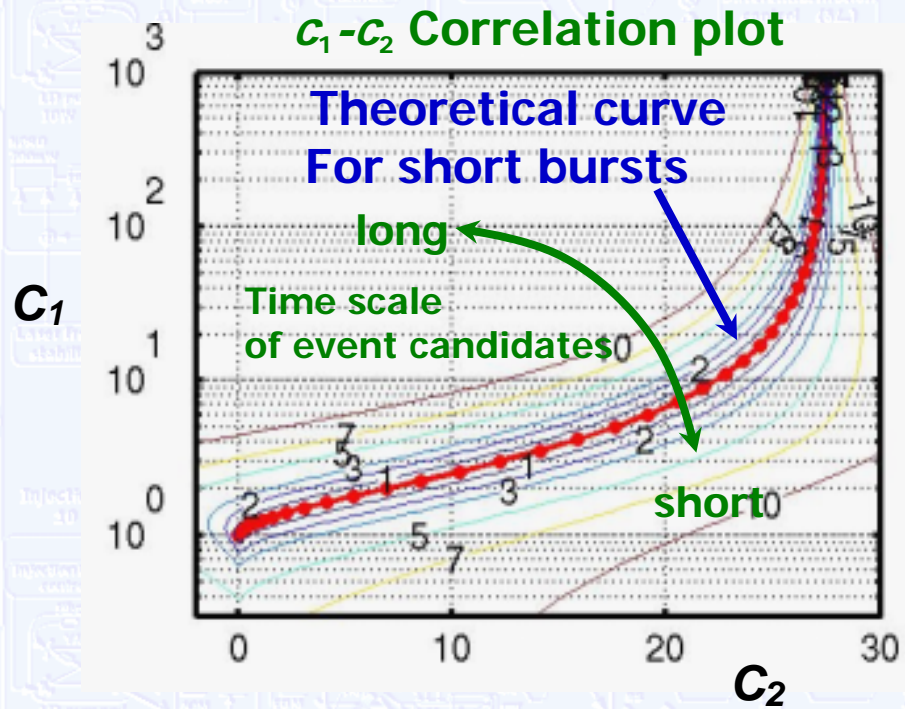
$$C_1 = \langle P_j \rangle$$

- 2nd-order moment

$$C_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\langle P_j^2 \rangle}{\langle P_j \rangle^2} - 1 \right)$$



Distance to theoretical curve (D) : 'likelihood' to be GW



Burst-wave analysis (2)

- Parameter selection -



- **Parameter selection : duration time, frequency band**

- Target : Burst waves

- **Short duration time, wide frequency band**

(c.f. cont. waves: long duration, narrow freq. band)

- For better SNR ...

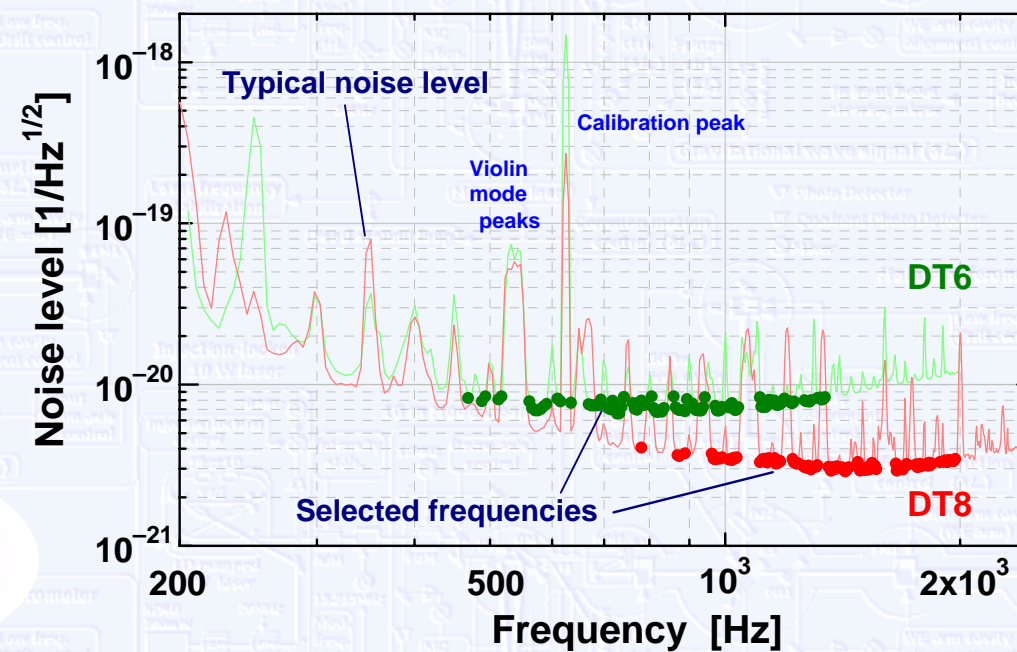
- Shorter time window

- Lower freq. Resolution
(affects by line peaks)

- Wider freq. band

- Degraded noise level

$\Delta t = 200$ [msec]
 $\Delta f = 500$ [Hz]

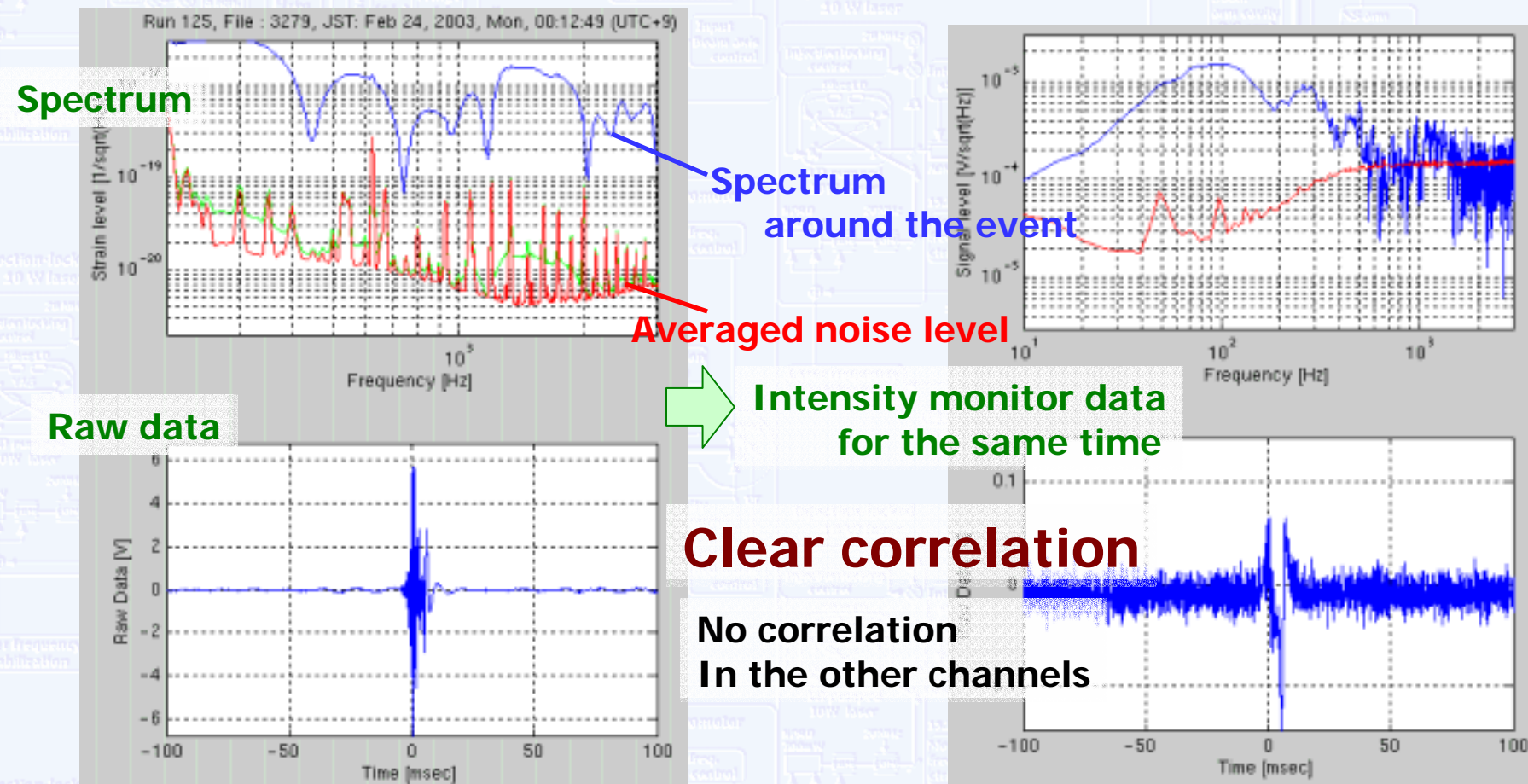


Veto analysis (1)

- Raw data around an event candidate -



- DT8, one of the largest events ($h_{rms} = 6 \times 10^{-16}$)



GW detector (4)

- Interferometric detector -



• Current status

- **Interferometric detectors**
 - 4 detectors under development
 - Improving sensitivity and stability
 - Started observation runs
 - Sufficient sensitivity to Galactic events
 - Set upper limits for binary inspiral events



LIGO Observatory

Detector	LIGO	VIRGO	GEO	TAMA
Site	USA	ITA	GER	JPN
Baseline length [m]	4000 (x2) 2000 (x1)	3000	600	300
Noise Level [$\text{Hz}^{-1/2}$]	3×10^{-22}	1×10^{-17}	8×10^{-20}	1.5×10^{-21}
Observation	2002 -	2004 (?)	2002 -	1999 -