

TAMA300の現状

国立天文台

新井宏二
(TAMA project)

Overview of this talk

● Introduction

レーザー干渉計型重力波検出器

TAMA300検出器の概要

国際的な干渉計開発の状況

● TAMA300 detector

Activity1: 50日間の観測 (2001/8-9)

データ解析の紹介

Activity2: リサイクリング実験 (2001/12~)

Forthcoming DT8

- **Introduction**

レーザー干渉計型重力波検出器

TAMA300検出器の概要

Gravitational wave detection (1)

● **重力波の直接検出**

中性子星連星の電波による観測

～ 重力波の存在の間接的証明

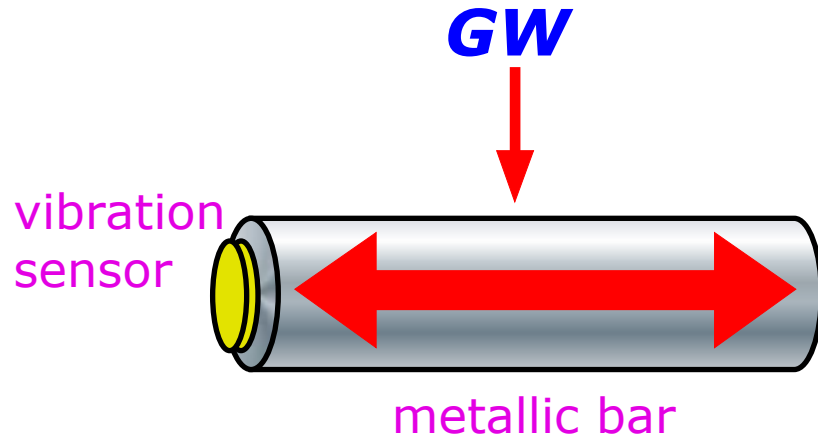
重力波の直接観測

～ 強重力場における一般相対論の直接検証

～ 重力波波形により得られる天体の様子
電磁波による観測とは質の異なる情報

Gravitational wave detection (2)

● 共振型検出器

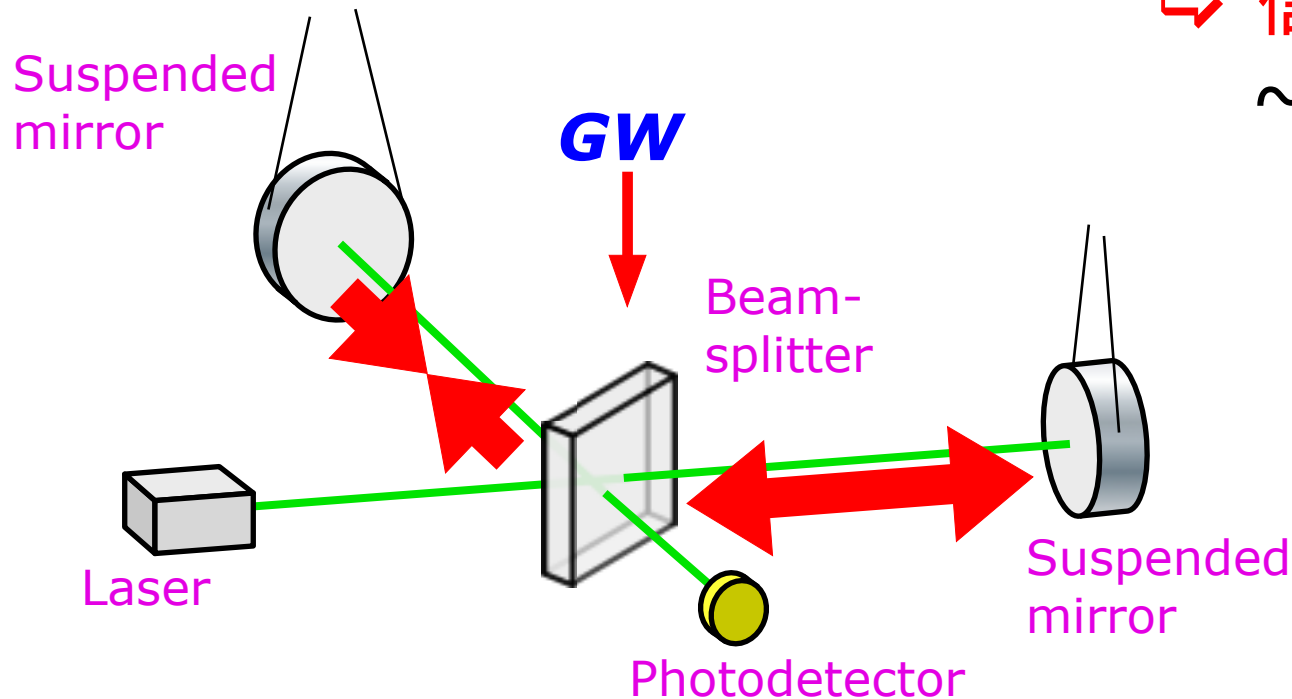


金属の塊の4重極モードの励起

⇒ 信号帯域: 狭い

~ 共振周波数付近でのみ働く検出器

● レーザー干渉計型検出器



干渉計腕の固有距離の差動変動

⇒ 信号帯域: 広い

~ 重力波波形が保存される

TAMA300 detector

- **基線長300mのレーザー干渉計型重力波検出器**

サイト: 国立天文台三鷹キャンパス(東京)

- **プロジェクトの目的**

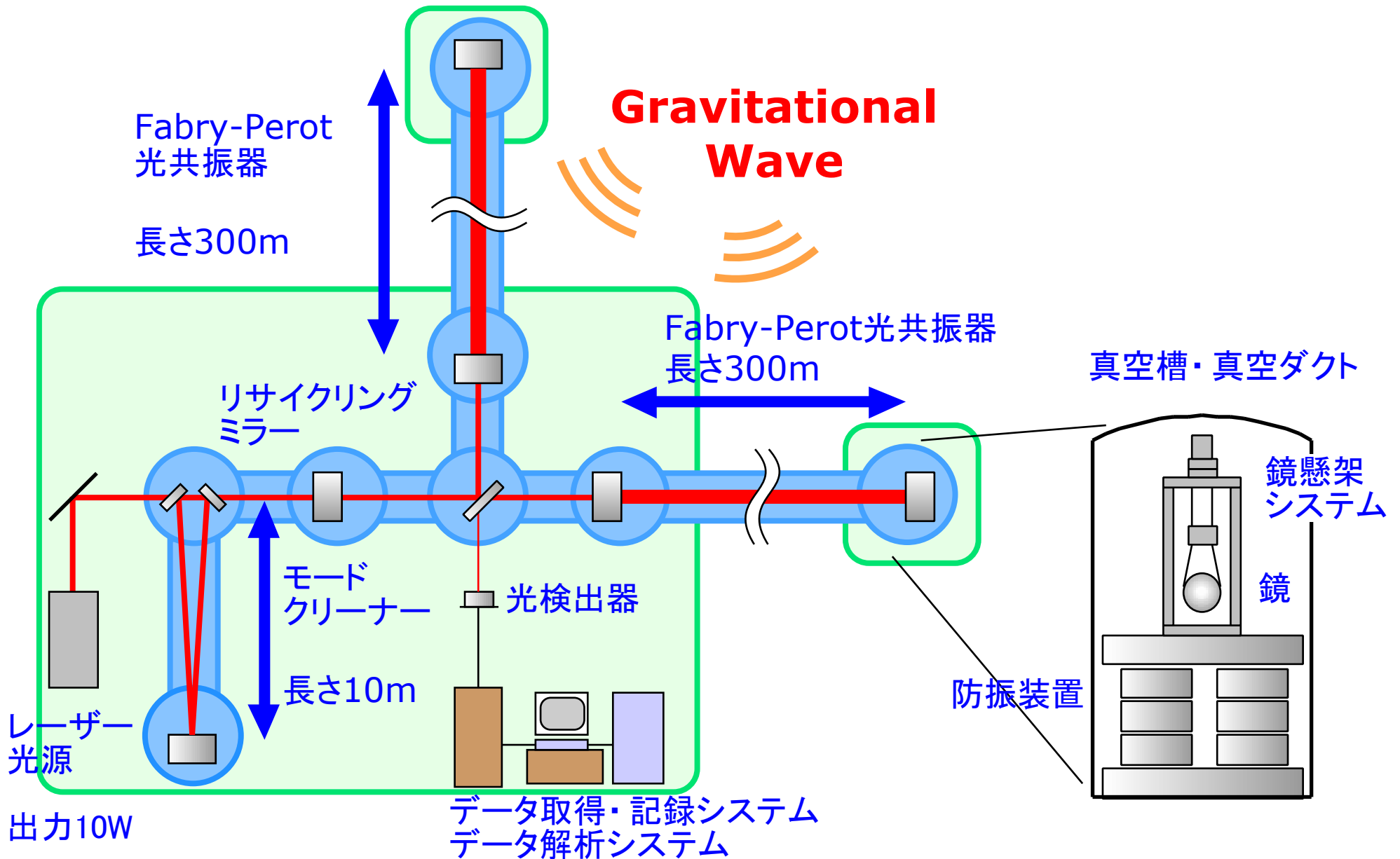
近傍銀河で発生する重力波イベントを検出可能な
実証型検出器を開発すること

将来のkm級干渉計を建設するために必要な技術を開発すること

- **理論感度限界**

~ $h_{\text{RMS}} = 3 \times 10^{-21}$ @300Hz (BW300Hz)

TAMA300 detector ~ overview



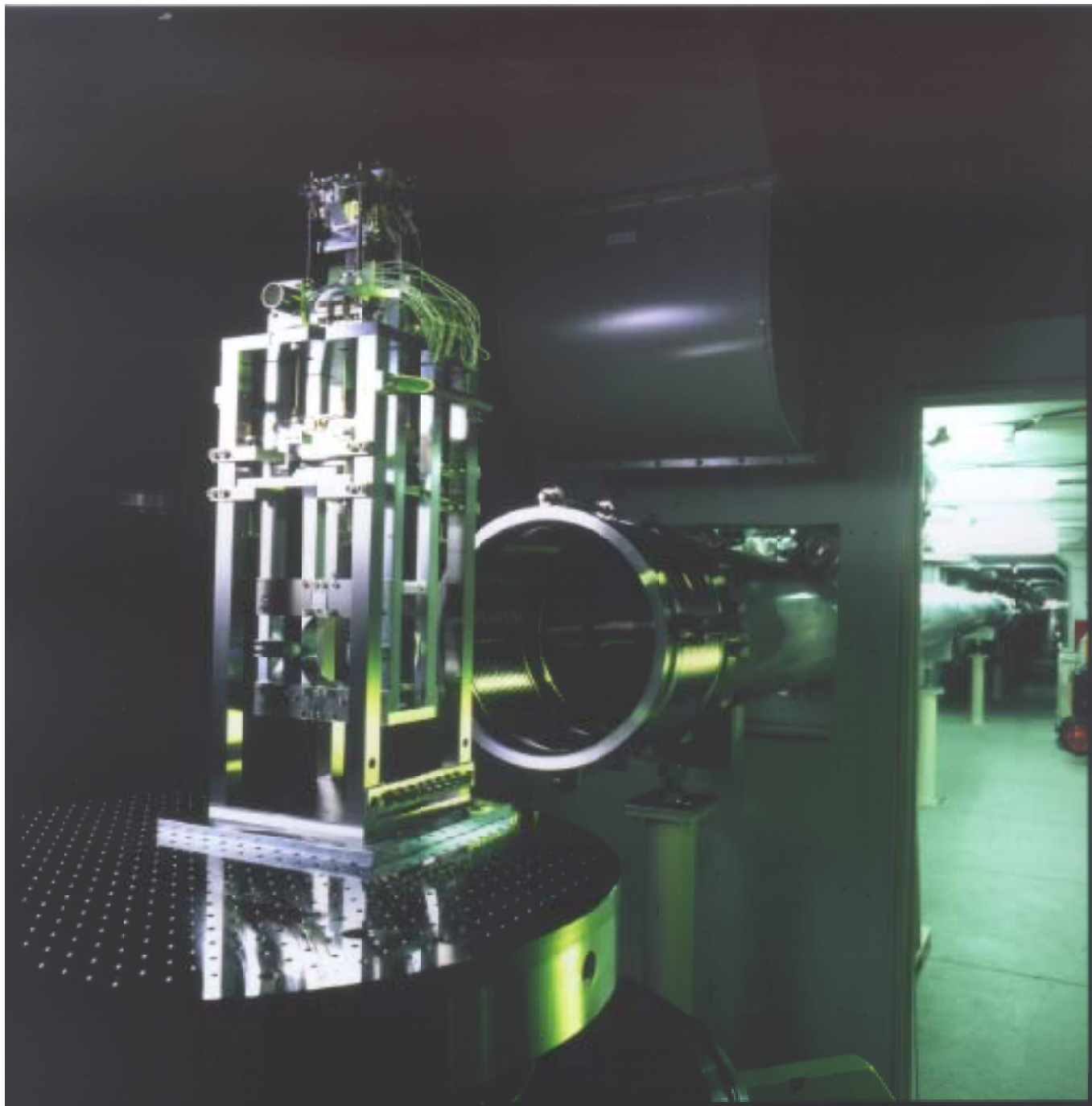
Center room



300m vacuum tube



Vibration Isolation System



● 3段構成の防振装置

アクティブ制御
エアスプリング

+

防振スタック
(ステンレス ブロックと
防振ゴムの
サンドイッチ)

+

2段振り子鏡懸架装置

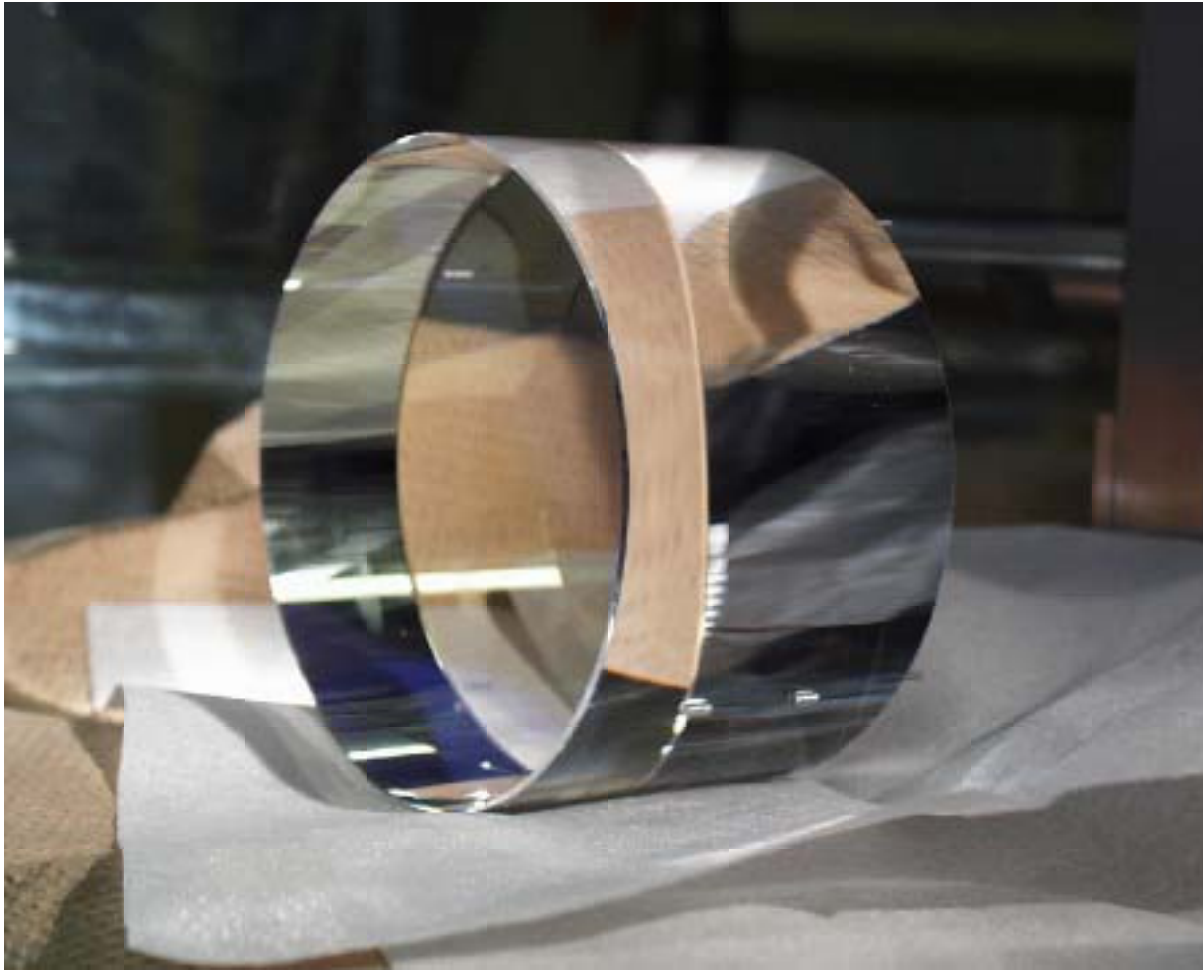
得られた防振性能:

150Hzで

10^{-8} 以上の減衰比

Mirror

- 熔融石英 (SiO_2)製 ϕ 100mm x 60mm



機械的に低損失

観測帯域での熱雑音を低減するため

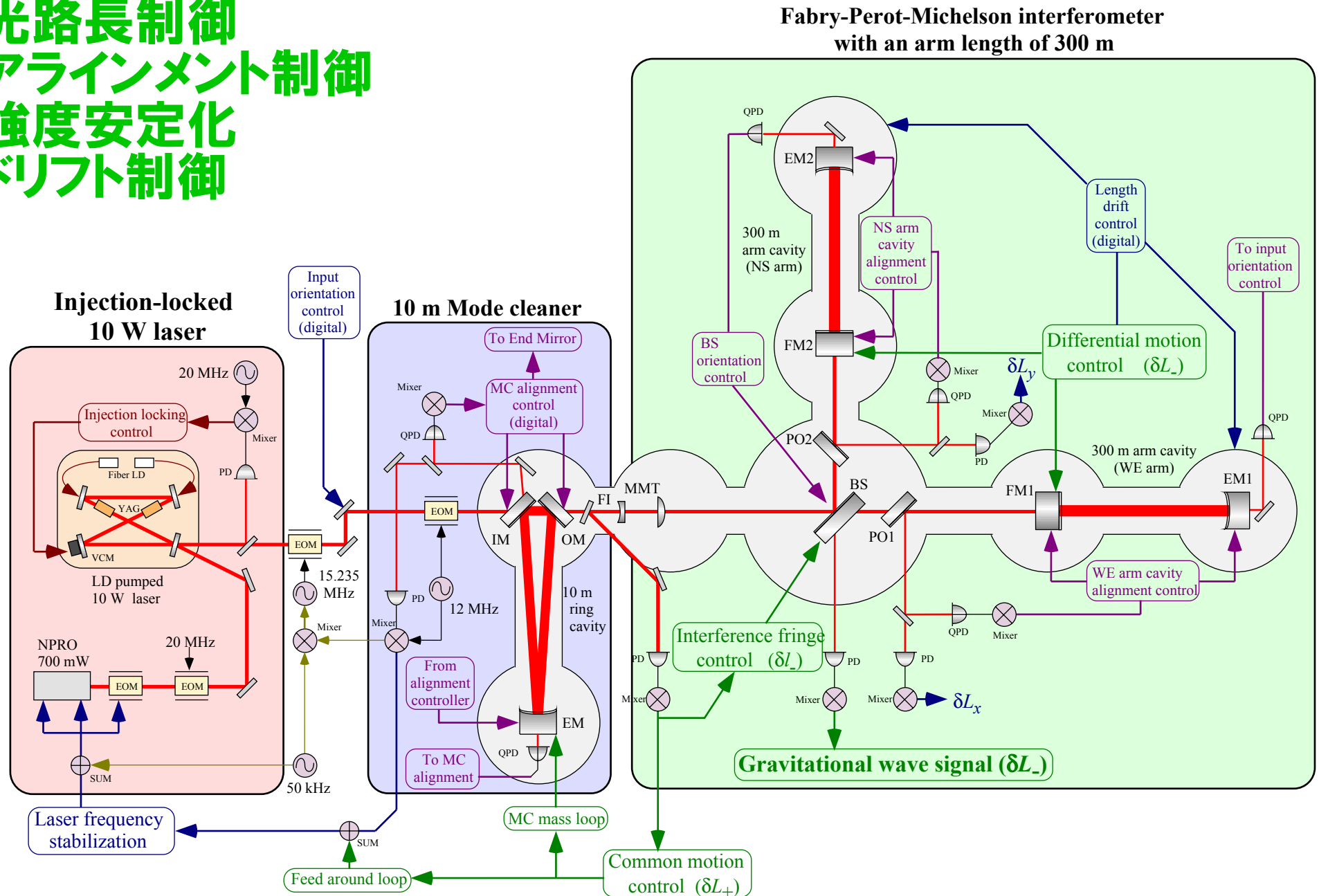
(機械的散逸大 = 熱揺動大)

光学的に低損失

超低反射損失 ($\sim 30\text{ppm}$)

制御系

光路長制御
アラインメント制御
強度安定化
ドリフト制御



Control electronics



現在稼動中 (稼動間近) の干渉計型重力波検出器

● 4計画で 6台の検出器

VIRGO

(Italy & France)

Site: Pisa
L=3km

GEO

Germany & Great Britain

Site: Hannover
L=600m

TAMA

Japan

Site: Tokyo
L=300m

LIGO

U.S.A.

Site:
Hanford 1
L=2km

Hanford 2
L=4km

Louisiana
L=4km



LIGO (U.S.A.) $L=4\text{km}+2\text{km} \ \& \ 4\text{km}$



LIGO Hanford

人里離れた静かなサイト
ただし風が吹くと比較的揺れる

Louisianaは木材の伐採と
深夜の貨物列車が悩み



LIGO Louisiana

1999から稼働を開始

⇒着実に感度と安定度を改善しつつある

これまでに9回のengineering run

Scientificデータのための観測を2002年夏開始

2003年2月～4月に2ヶ月間の観測を予定

GEO (German-British alliance) L=600m



**Hannover大の農場
都市から20kmながら
昼夜ともに振動の少ない
良サイト**

風には弱い

**2002から本格稼働し、engineering runとscientific runを経験
光学構成を変更しSignal Recyclingといわれる技術を導入中
2003年2月～4月に2ヶ月間の観測を予定**

VIRGO (French-Italian alliance) $L=3\text{km}$



**Pisa近郊Cassinaの
田園地帯に建設
⇒基本的に静か**

**高さ7mに及ぶ巨大防振
装置を備え、
10Hz付近の低周波から
重力波検出を狙える**

大型検出器としては未稼働

⇒2002年春腕の建設が終了

⇒これまでは、もっぱら中央の部屋での実験に終始

4回のengineering runs

2003年から腕を含めた実験に移行

TAMA (Japanese) $L=300m$

● サイト: 国立天文台三鷹キャンパス(東京)

(E139.32.21 N35.40.25)

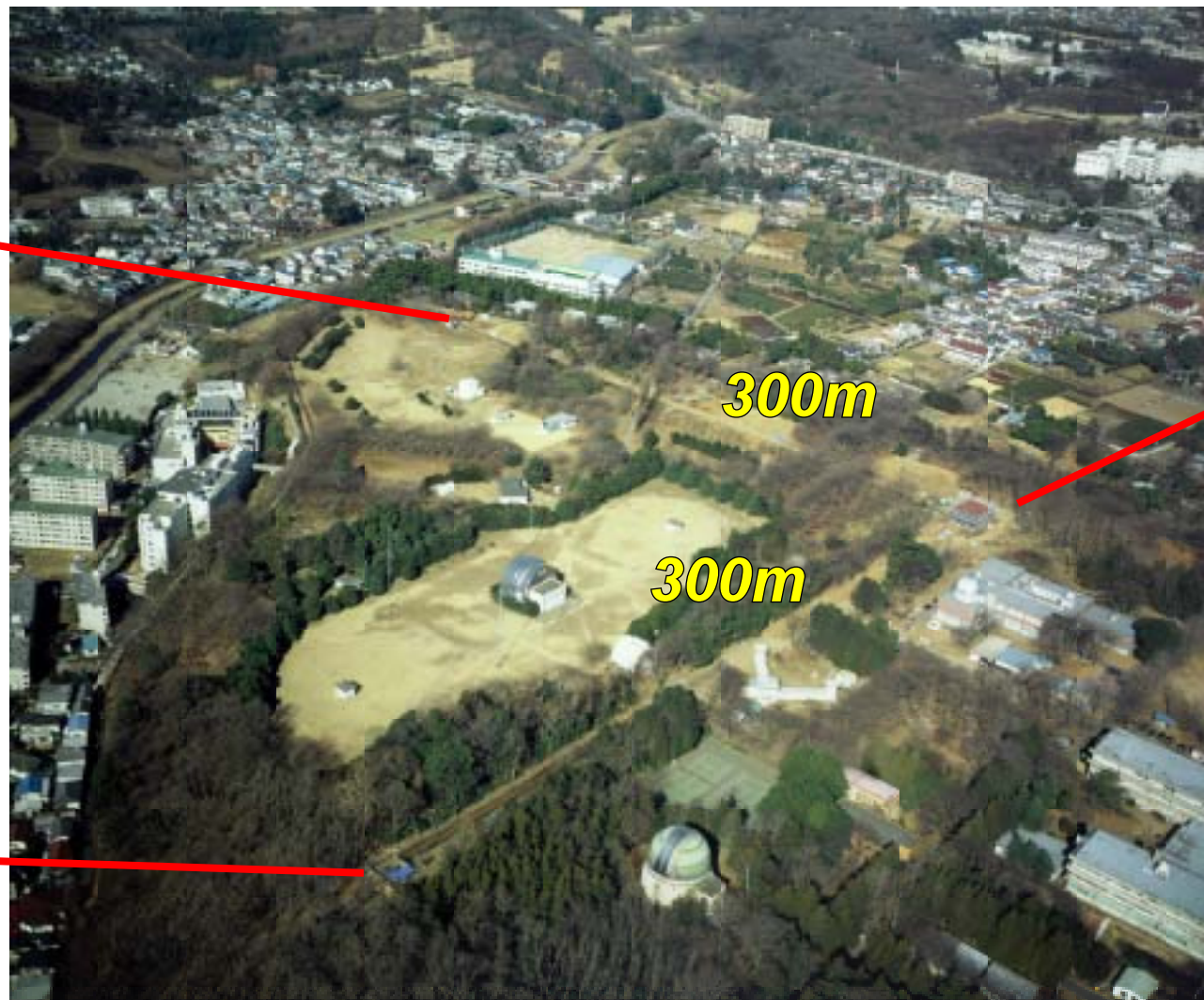
West
End
Room

Center
Room

300m

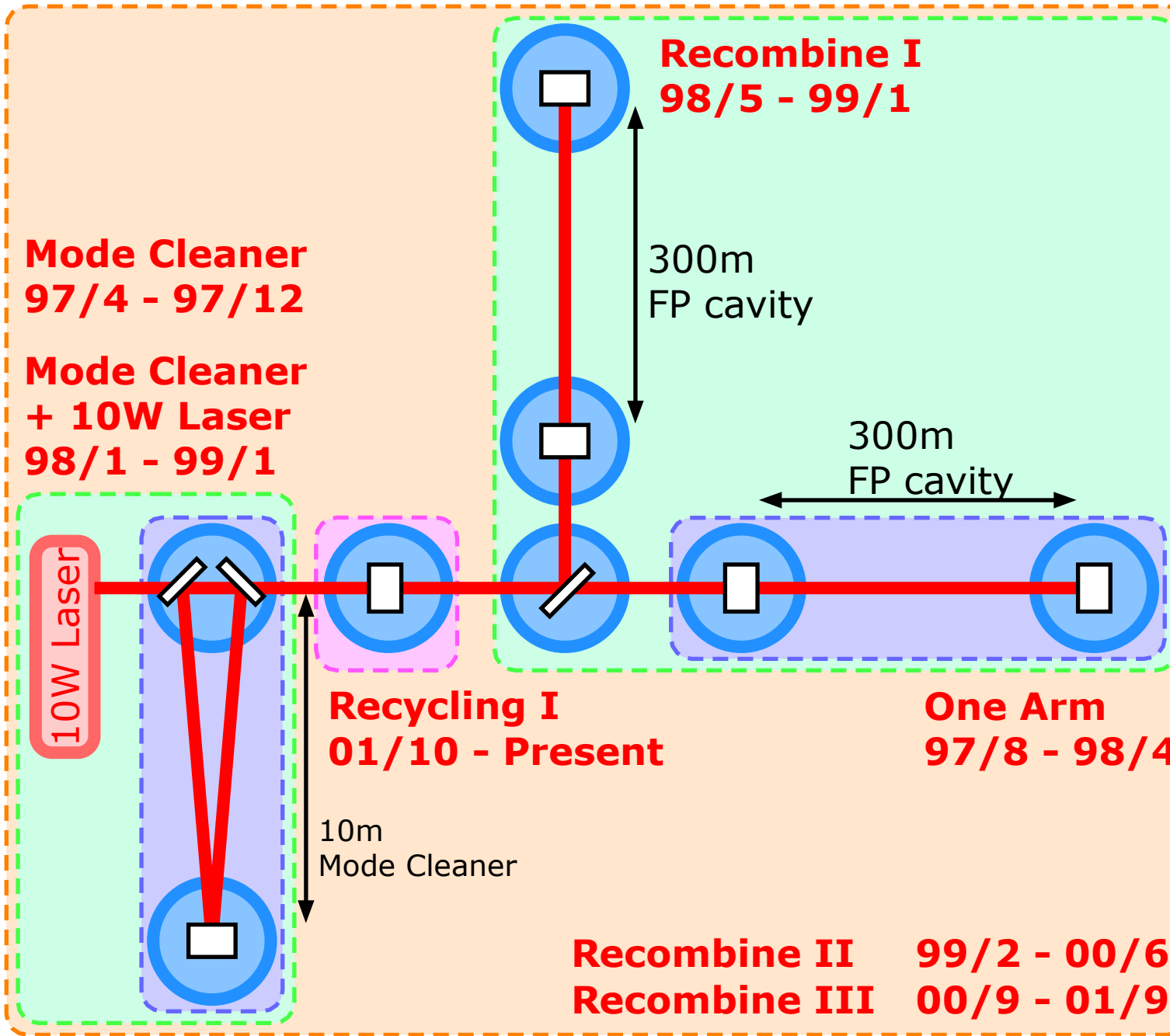
300m

South
End
Room



市街地の真っ只中に位置・交通量多し

History of TAMA development



1995	Project started
1996	Facility construction completed
1997	Vacuum system completed
1999/8	Data Taking 1 11h
1999/9	Data Taking 2 31h
2000/4	Data Taking 3 13h
2000/8, 9	Data Taking 4 167h
2001/3	Data Taking 5 111h
2001/8,9	Data Taking 6 1038h
2001/10-	Recycling experiment
2002/8-9	Data Taking 7 25h

- **Status of TAMA300 (I)**

DT6: 50日間の観測 (2001/8-9)

DT6データ解析の紹介

これまでのTAMAによる観測 (*DT: Data taking*)

パワーリサイクリングなし

DT1	1999 Aug. 6-7	1夜	11 hours
DT2	1999 Sep. 17~20	3夜	31 hours
DT3	2000 Apr. 20~23	3夜	13 hours
DT4	2000 Aug. 21~Sep. 4	13夜	167 hours
DT5	2001 Mar. 2~8	6日	111 hours
DT6	2001 Aug. 1~Sep. 20	50日	1038 hours

これらの観測は他のプロジェクトのscience runに先駆けて行われた

パワーリサイクリングあり

DT7	2002 Aug, 31~Sep. 2	1日	25 hours
-----	---------------------	----	----------

DT6の成果

- 銀河系内のイベントに対して十分な感度での観測

歪み感度: $h = 5 \times 10^{-21} / \text{Hz}^{1/2}$

NS合体をSNR10で観測可能な距離: 33kpc

- 干渉計の安定な運転 ~ 高い稼働率

総観測データ量: 1038時間 (86.5%)

(干渉計が動作していても調整をしていた時間は除外している)

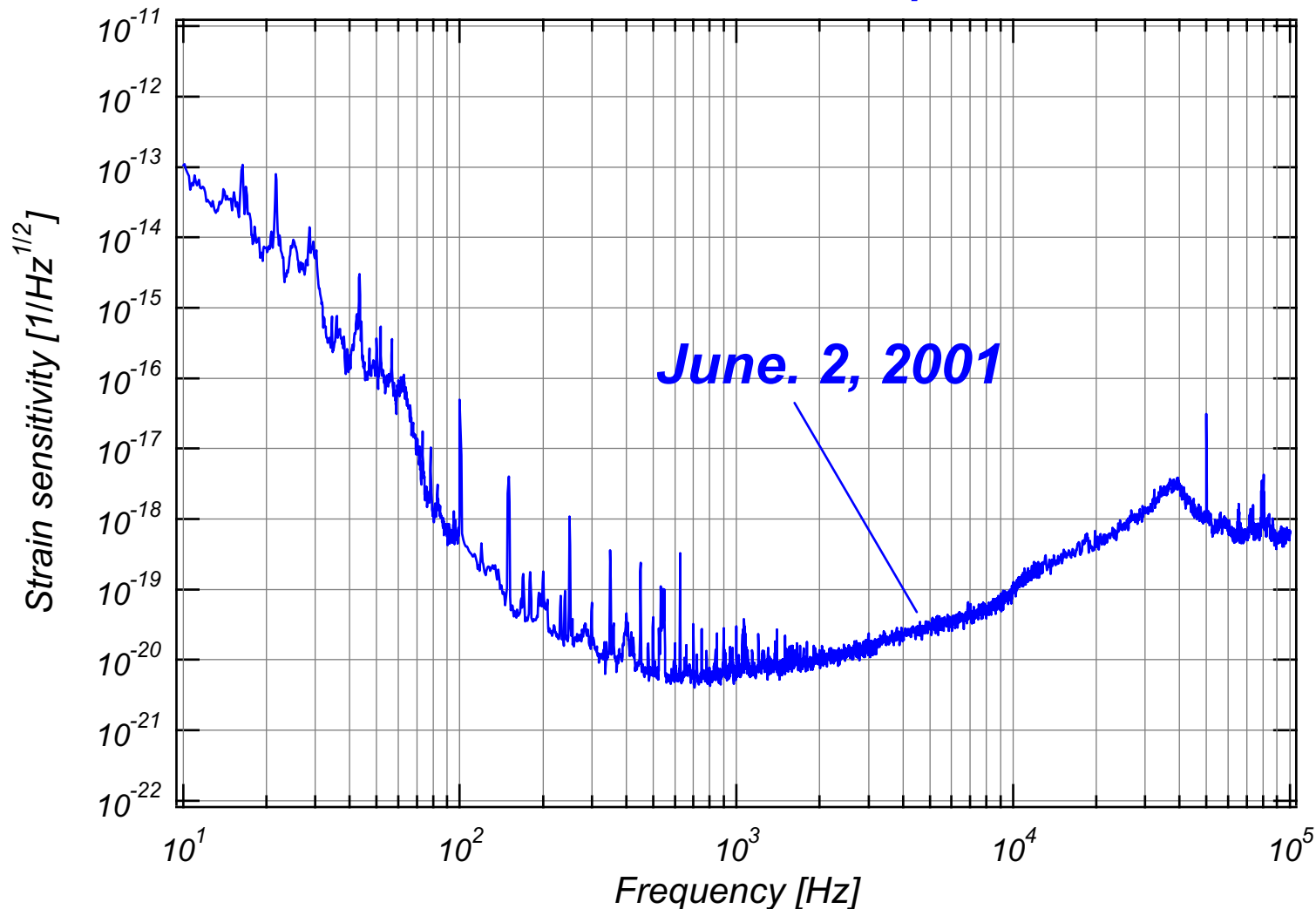
- 神岡20mプロトタイプ干渉計との同時観測

同時稼働: 709時間 (59.1%)

⇒ 高橋弘毅氏のtalk

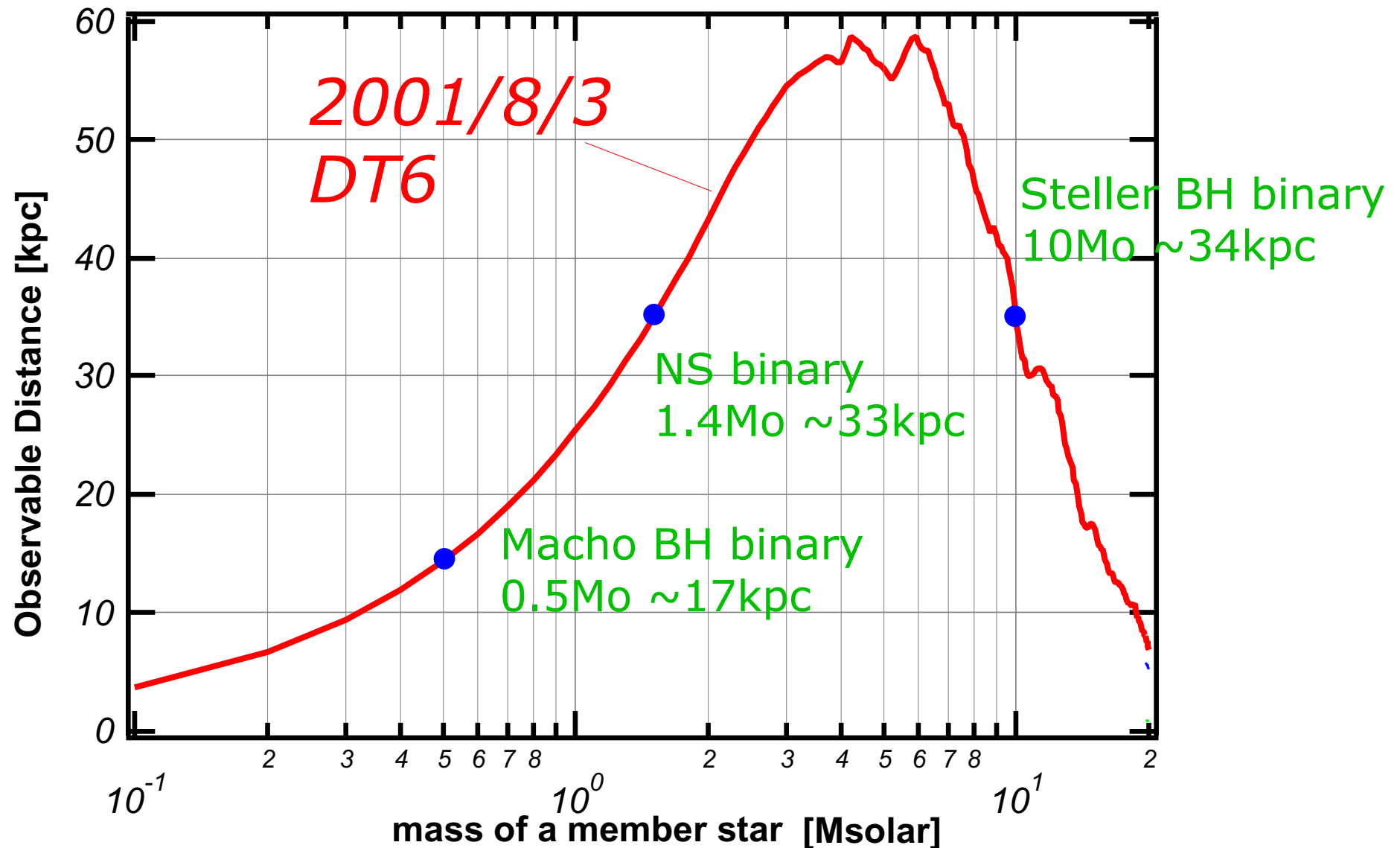
Achieved sensitivity (DT6時点)

- 変位雑音レベル $dx = 1.5 \times 10^{-18} \text{ m/Hz}^{1/2}$
歪み感度 $h = dx/300$ (@700Hz)
 $= 5 \times 10^{-21} / \text{Hz}^{1/2}$



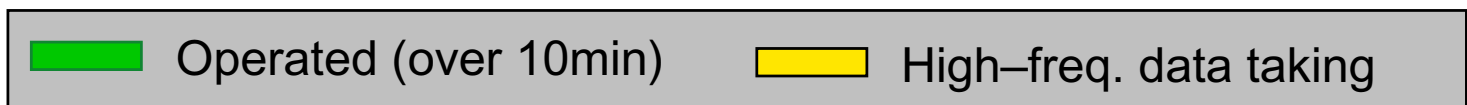
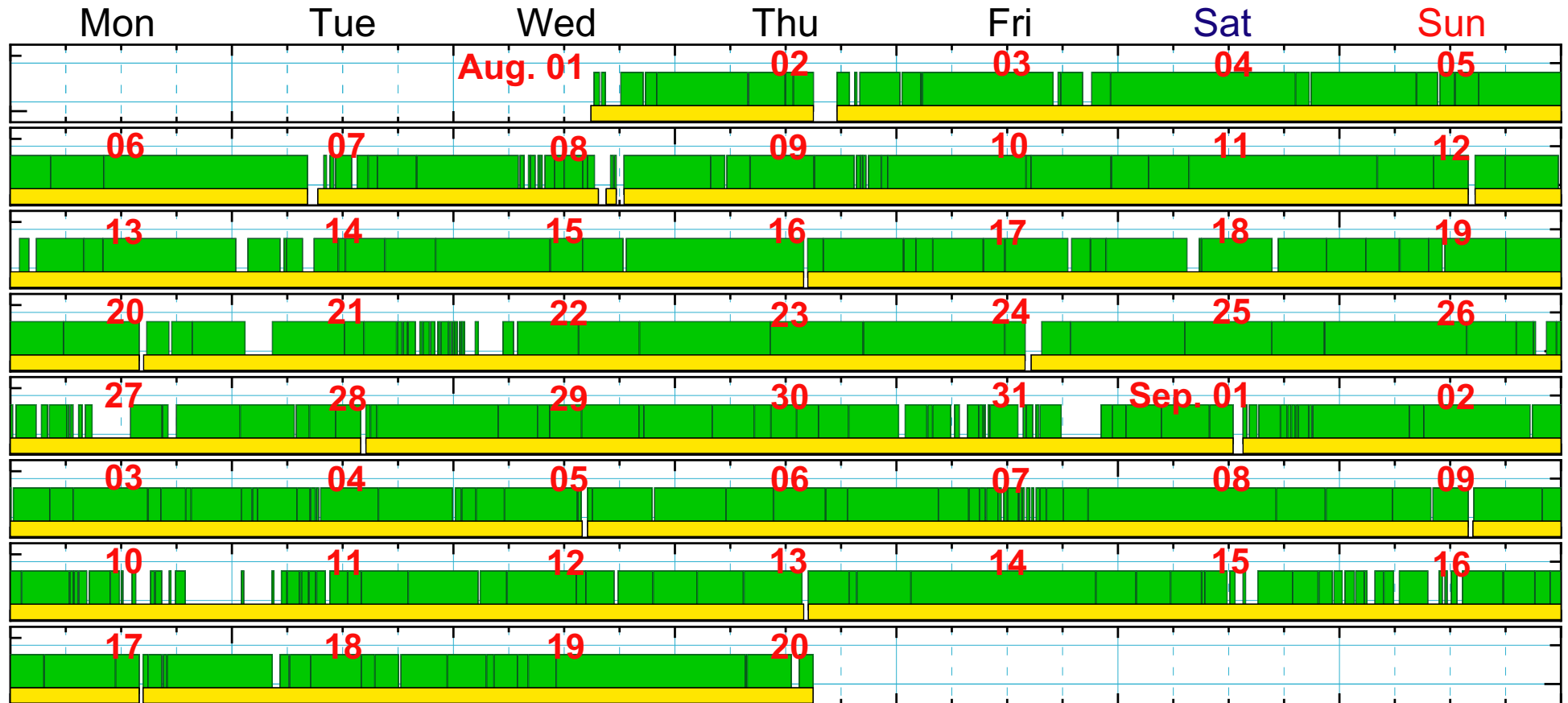
DT6: SNR to compact binaries

- コンパクト連星ispiralに対するmatched filter解析でどの距離までならSNR=10で観測できるか？



Observation calendar

Date in JST



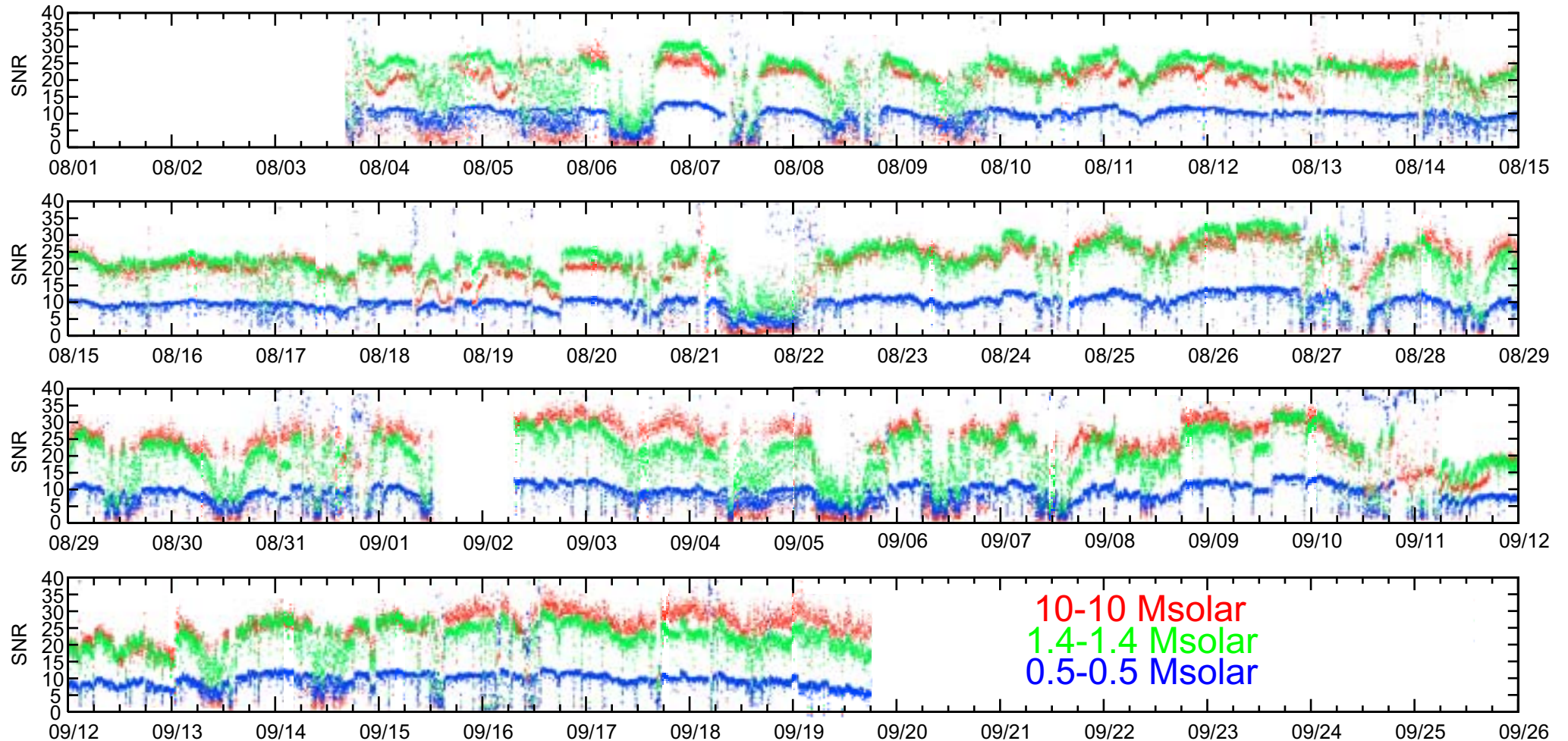
Causes of obs. time loss

Total obs. time: 1038:07:35, Duty cycle: 86.5105%



SNR trend during DT6

- About 80% is adequate to analyses



=> To data analysis

DT6データの解析

● *Matched Filtering*解析

- ◎ 1~2Moのコンパクト連星合体 (田越 et al.)
- TAMA-LISM coincidence解析 (高橋(弘), 田越 et al.)
- ~0.5MoのMacho BH連星合体 (辰巳 et al.)
- BH ringdown解析 (常定, 中野, 神田 et al.)

● *Burst analysis*

- ◎ 雑音とバースト重力波の時定数の違いを利用した検出法 (安東 et al.)

● *Periodic source*

- ◎ SN1987aのremnantからのpossible連続波解析 (副田 et al.)

● *Wavelet*解析

- Chirp信号のWavelet解析 (神田 et al.)

Gravitational wave search: Compact binary Inspiral

Matched filtering analysis (Tagoshi, et al.)

We analyzed 1000 hours data of DT6 by matched filtering to search for compact binary inspirals

Upper limit to the event rate:

•DT2: 0.59/hours (0.3-10Msolar) (Phys.Rev.D63,062001(2001))

•DT4: 0.027/hours (0.3-4.7Msolar)

•DT6: Upper limit to Galactic event rate:

0.0095/hours (1-2Msolar)

TAMA-LISM coincidence analysis (Takahashi's talk)

is also done

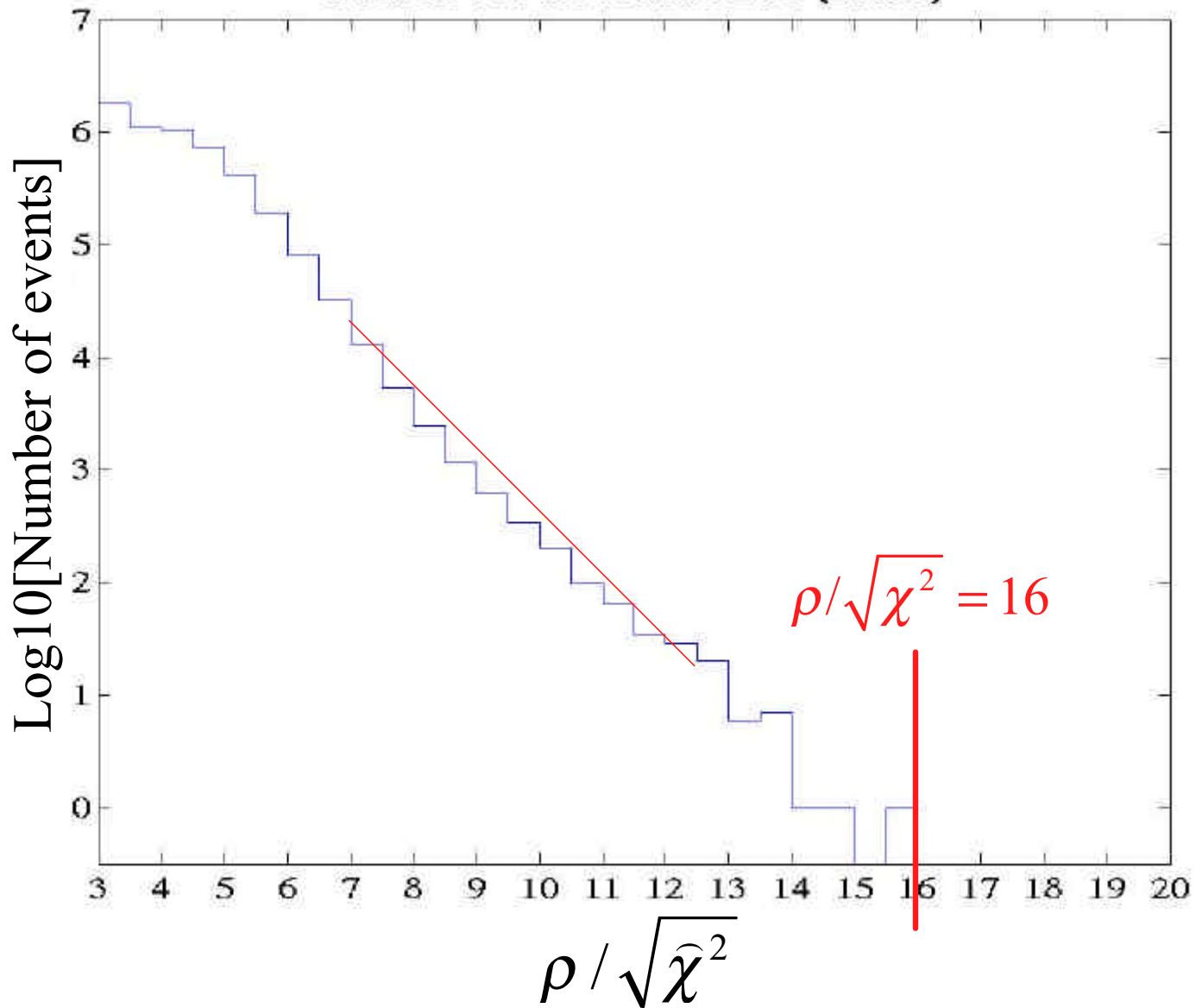
Matched filter

- Detector outputs: $s(t) = Ah(t) + n(t)$
 - $h(t)$: known gravitational waveform (template)
 - $n(t)$: noise. ↘ Post-Newtonian approximation
- Outputs of matched filter:

$$\rho(m_1, m_2, t_c, \dots) = 2 \int \frac{\tilde{s}(f) \tilde{h}^*(f)}{S_n(f)} df$$

- $S_n(f)$ noise spectrum density
- signal to noise ratio $\text{SNR} = \rho / \sqrt{2}$
- Matched filtering is the process to find optimal parameters which realize $\left(\max_{m_1, m_2, t_c, \dots} \rho(m_1, m_2, t_c, \dots) \right)$

Search result TAMA DT6 (25ms)



Upper limit to the Galactic event rate

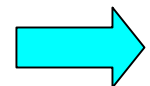
threshold=16 ($\sim S/N=11$) (fake event rate=0.8/year)

Efficiency for Galactic events $\epsilon = 0.23$ (from simulation)

• We also obtain upper limit to the average number of events over threshold by standard poisson statistics analysis

→ $N=2.3$ (C.L.=90%)

• Data length used : $T=1039$ hours



Upper limit to the Galactic event rate

$$= \frac{N}{T\epsilon} = 0.0095 \text{ [1/hour]} \text{ (C.L. = 90\%)}$$

c.f. Caltech 40m : 0.5/hour (C.L.=90%)

Allen et al. Phys. Rev. Lett. 83, 1498 (1999).

Burst wave analysis (4)

--- DT6 data analysis ---



- Data Taking 6 (Summer 2001)

- Analyze last 1-week data

- **Bandwidth : 500Hz**

Rejected data : 20%

(False dismissal rate : 1ppm)



Improvement of
false event rate : 1/1000

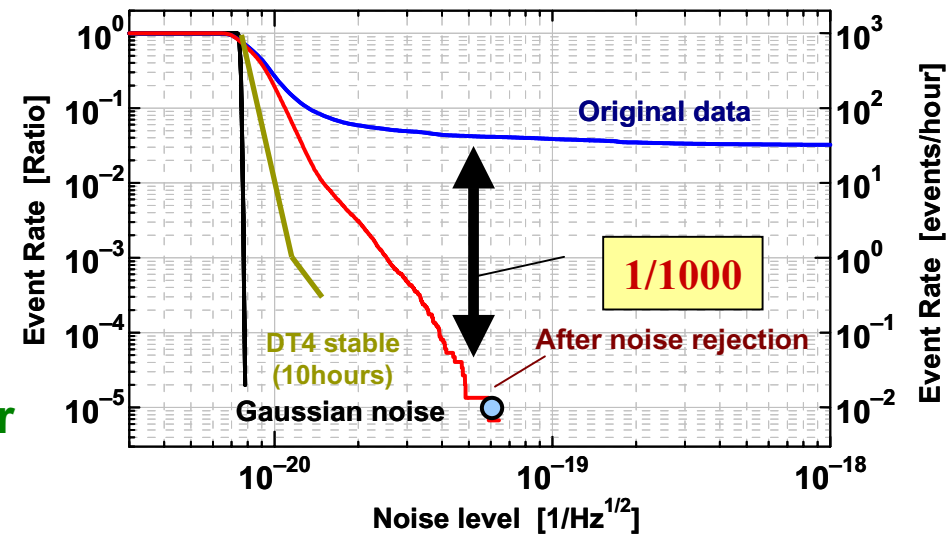
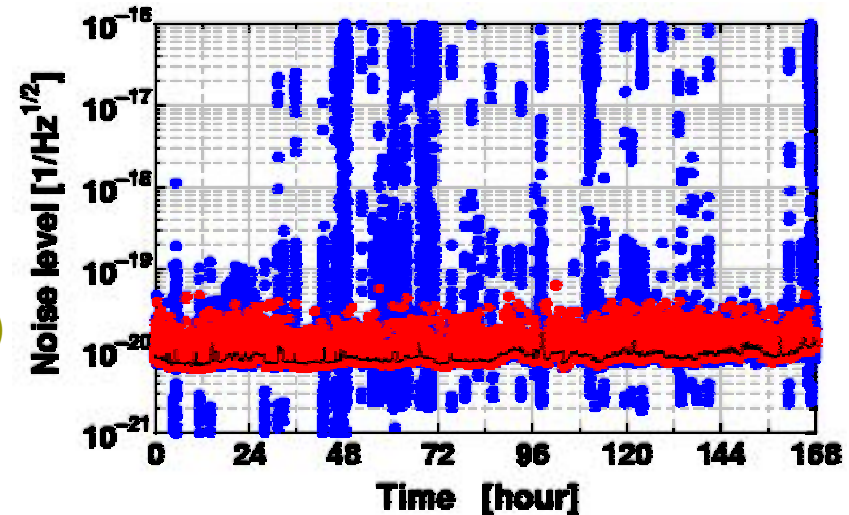
- Still worse than stable hours
in DT4, and Gaussian noise level



- Event rate for 10msec GWs

- $h_{rms} \sim 1 \times 10^{-17}$: 1 events/hour

- $h_{rms} \sim 3 \times 10^{-17}$: 10^{-2} events/hour



Continuous wave from SN1987A

- **Continuous GW wave search
at around 935Hz from SN1987a remnant
(Soida, et al.)**

Expected Waveform: **Sinusoidal**

($f=934.908\text{Hz} \pm 0.05\text{Hz}$)

+ time dependence of the sensitivity

+ doppler correction

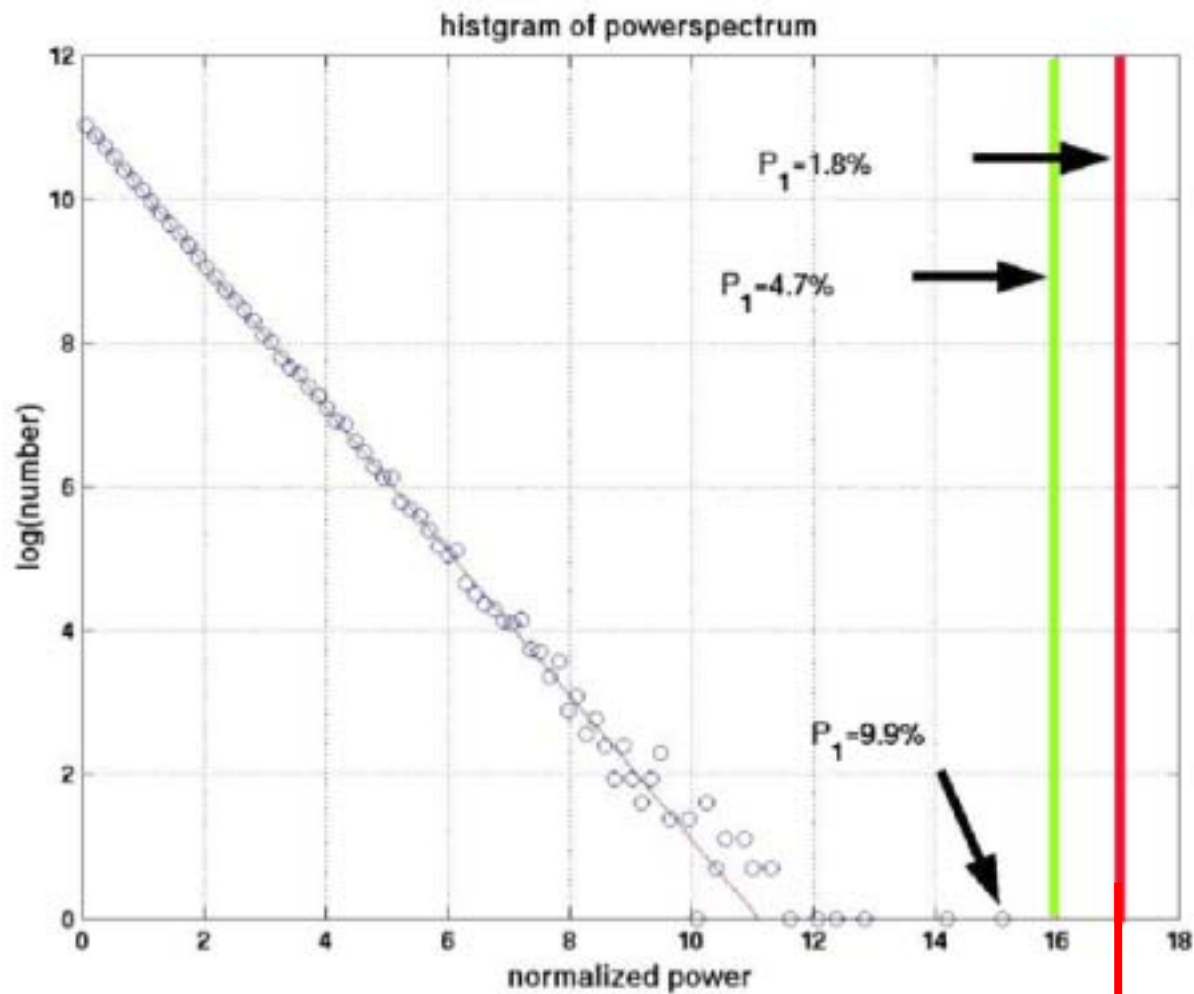
(the earth's daily/yearly round)

+ spindown correction

(assume spindown rate: 2.5×10^{-10} [Hz/s])

Search: DT6 50days data

Search result



$h=3.8 \times 10^{-23}$
(False alarm rate 1.8%)

Theoretical upper limit from spindown rate: $h=9.4 \times 10^{-27}$

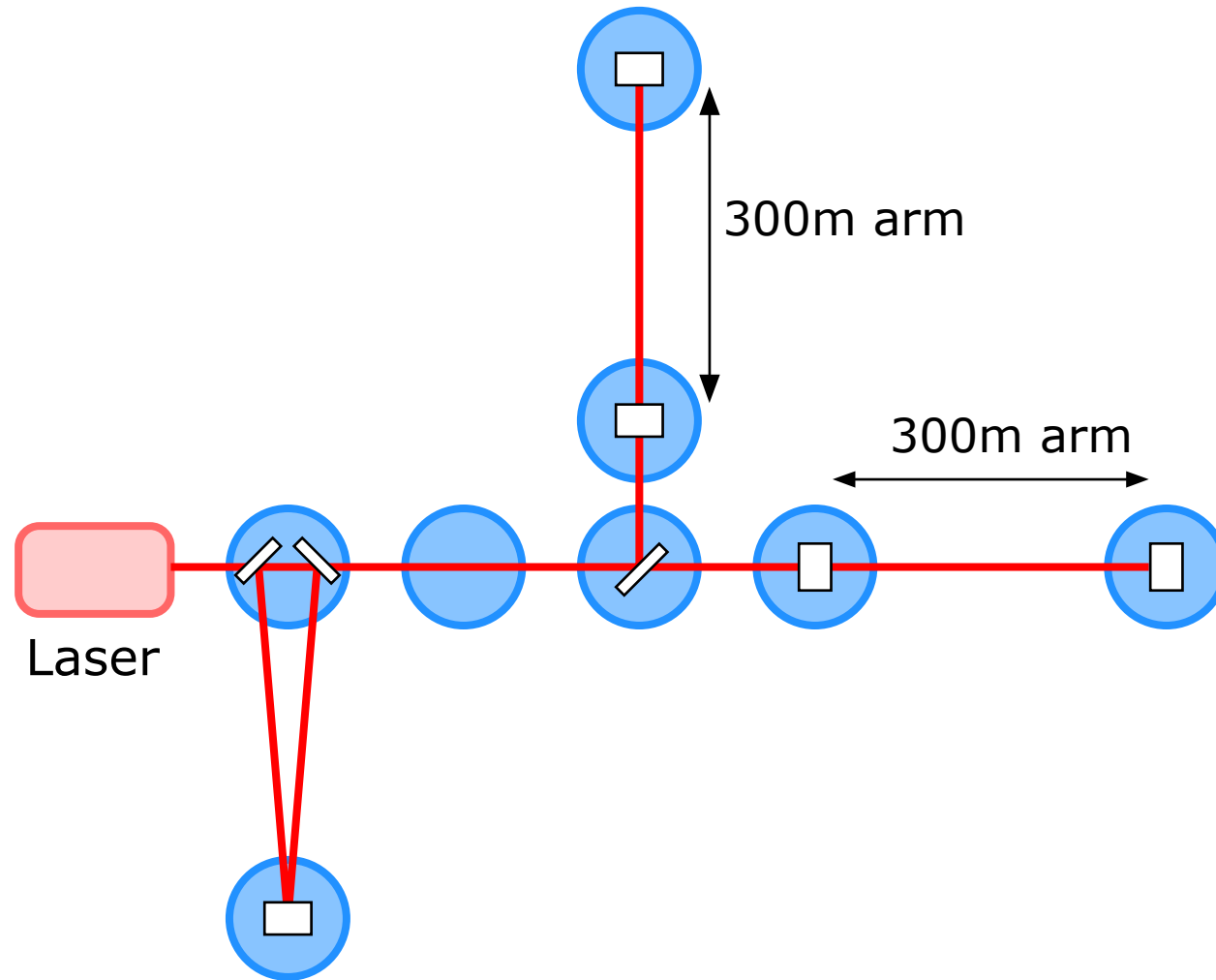
- **Status of TAMA300 (II)**

リサイクリング実験 (2001/12~)

Forthcoming DT8

パワーリサイクリング

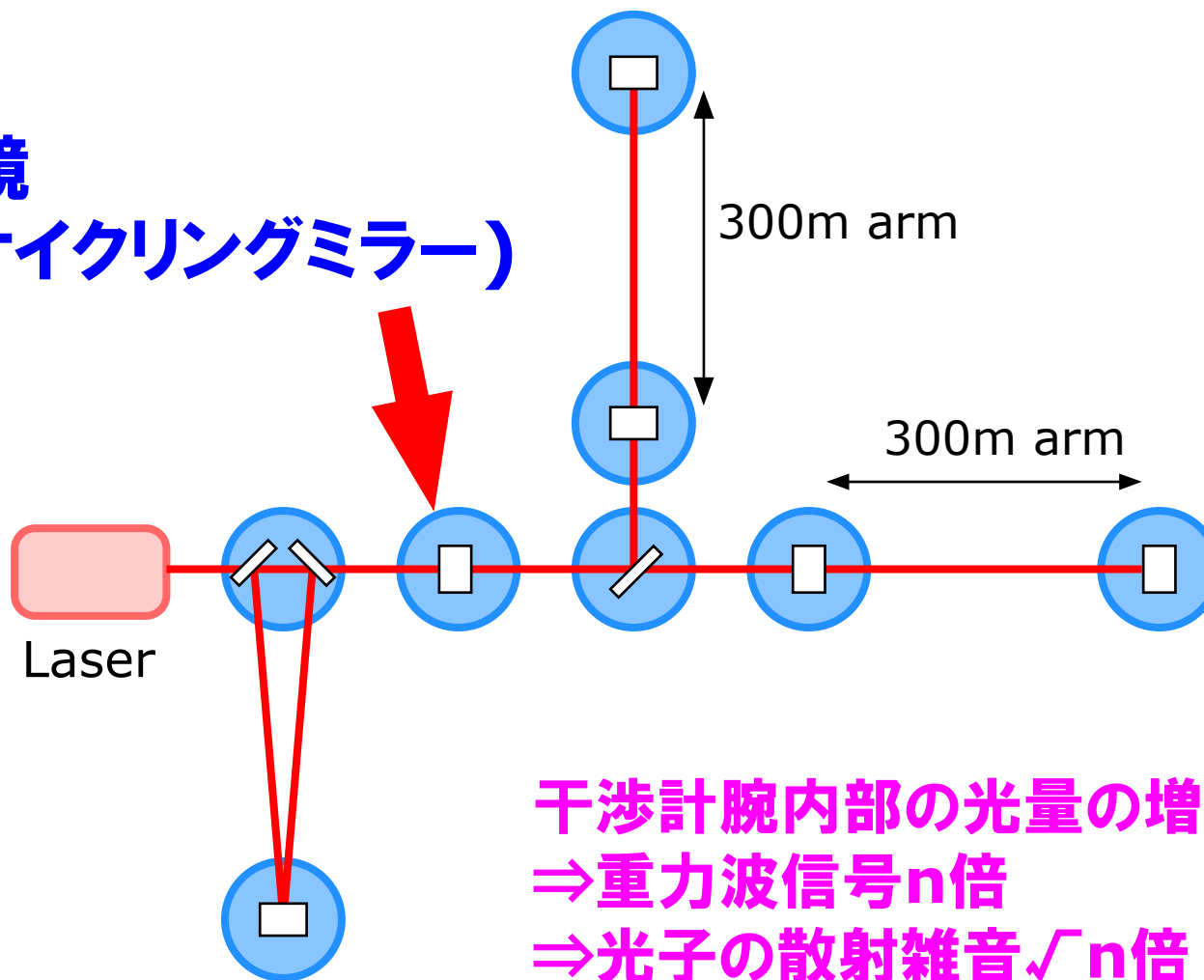
- 干渉計内の光量を増強する技術



パワーリサイクリング

● 干渉計内の光量を増強する技術

部分透過鏡
(パワーリサイクリングミラー)



干渉計腕内部の光量の増加 n 倍
⇒ 重力波信号 n 倍
⇒ 光子の散乱雑音 \sqrt{n} 倍

結果として信号雑音比 \sqrt{n} 倍

パワーリサイクリングの原理

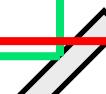
- なぜリサイクリングミラーを挿入すると、干渉計内部の光量が増加する???

例として
単純なマイケルソン干渉計

「ブライト」フリンジ
(明干渉:
ほとんどの光が
返ってくる)



高反射率鏡
(光は抜けてこない)



「ダーク」フリンジ
(暗干渉: 光は出てこない)

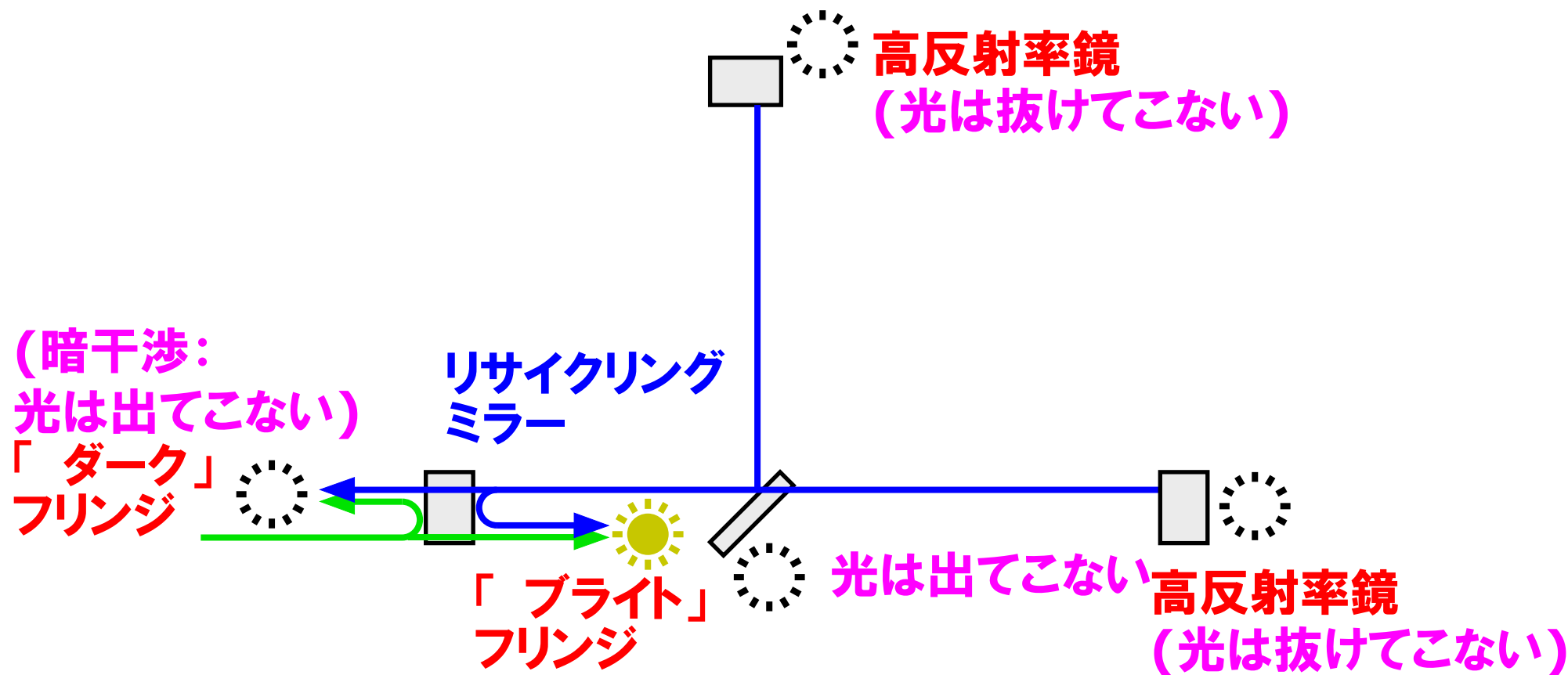


高反射率鏡
(光は抜けてこない)



パワーリサイクリングの原理

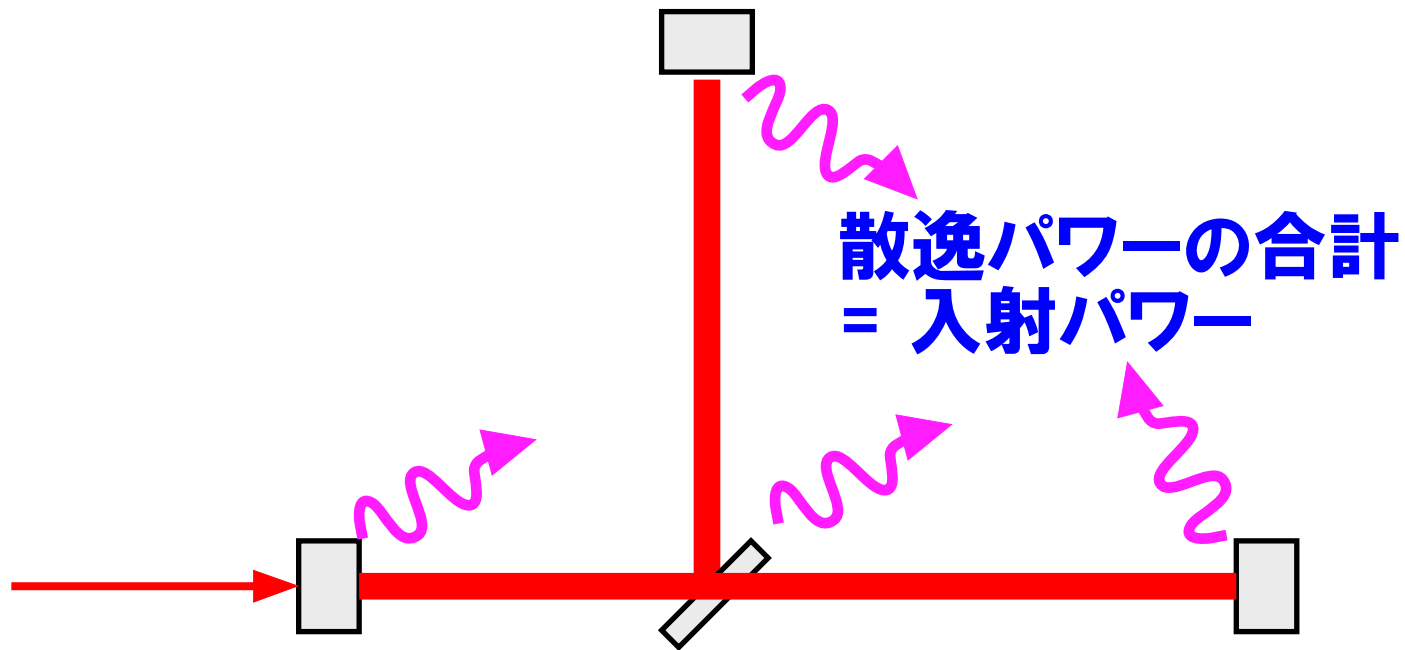
- なぜリサイクリングミラーを挿入すると、干渉計内部の光量が増加する???



問題: 干渉計に入射した光が出て行く場所がない。
いったい光はどこへ行ってしまうのか?

パワーリサイクリングの原理

- レーザー光は干渉計内部に閉じ込められてしまう
この様な状態を「光リサイクリングしている」という

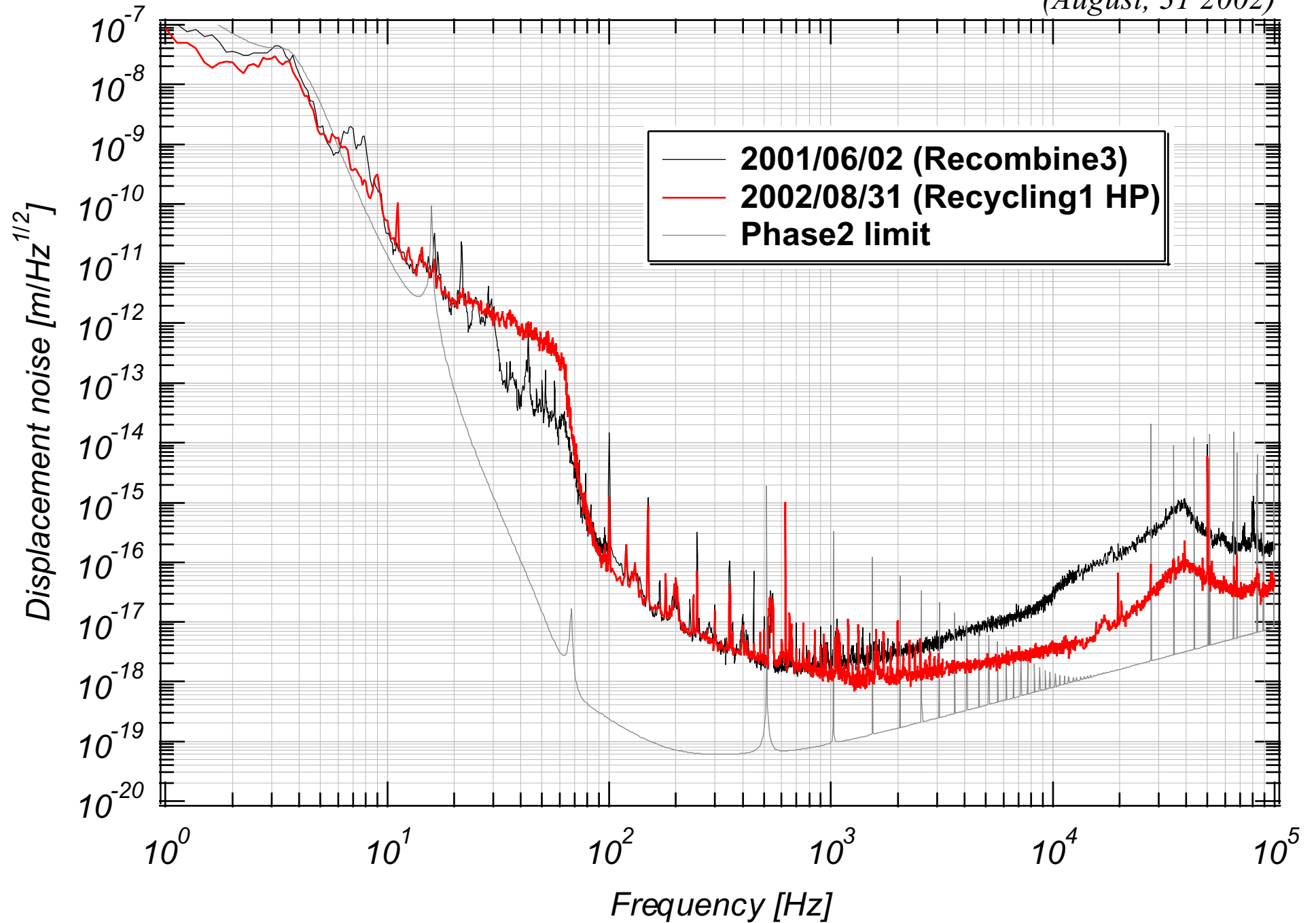


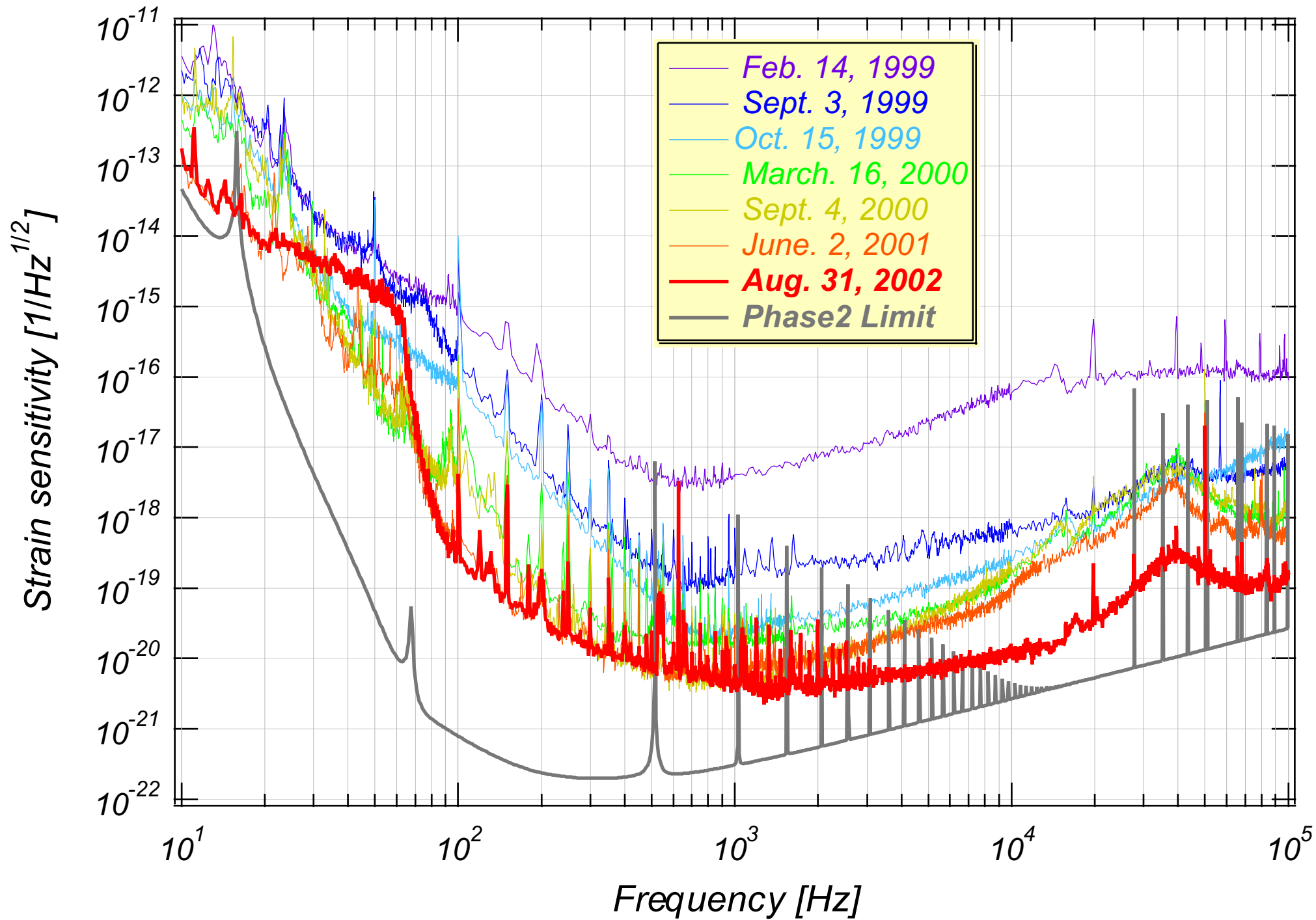
$$P_{\text{inc}} = \epsilon_{\text{loss}} P_{\text{internal}} \rightarrow P_{\text{internal}} = \frac{P_{\text{inc}}}{\epsilon_{\text{loss}}} \equiv g P_{\text{inc}}$$

内部散逸と入射パワーがつりあうまで内部光量が増加
内部の散逸が小さいほど増加率は高くなる

Displacement noise level of TAMA300

(August, 31 2002)

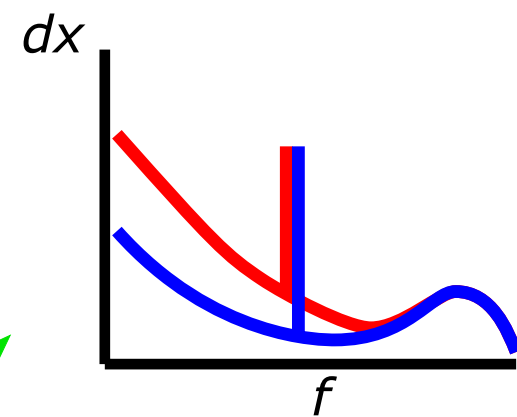
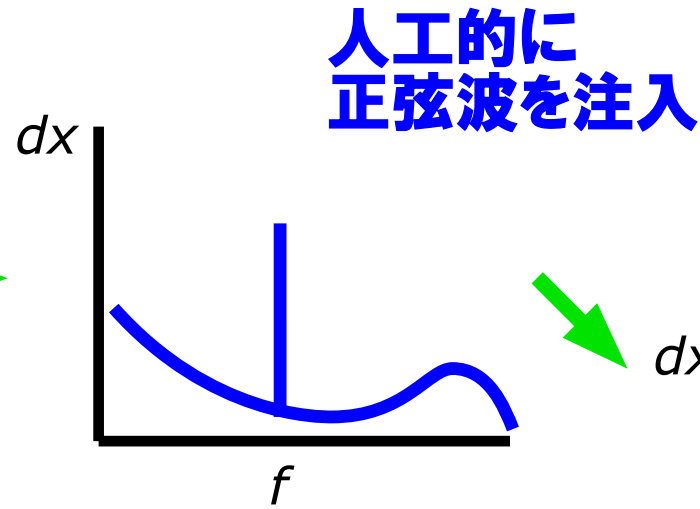
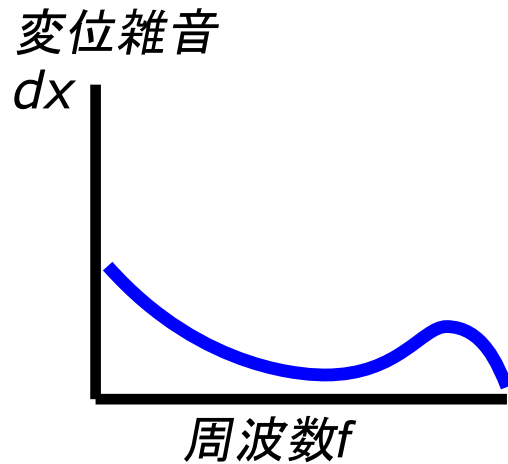




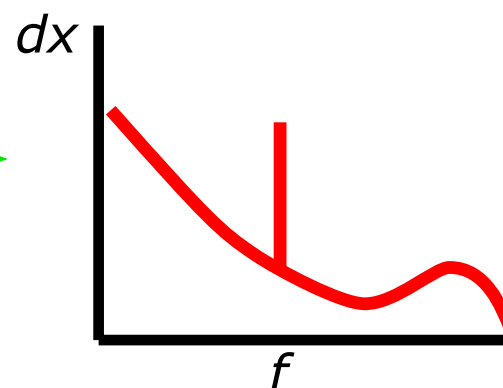
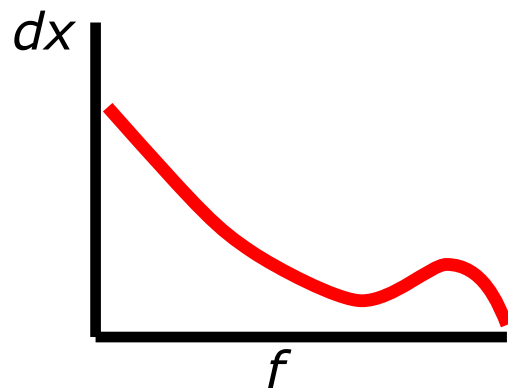
如何にして雑音の寄与を見積もるか

- 信号注入による雑音レベルの見積もり

例：
レーザー
周波数雑音



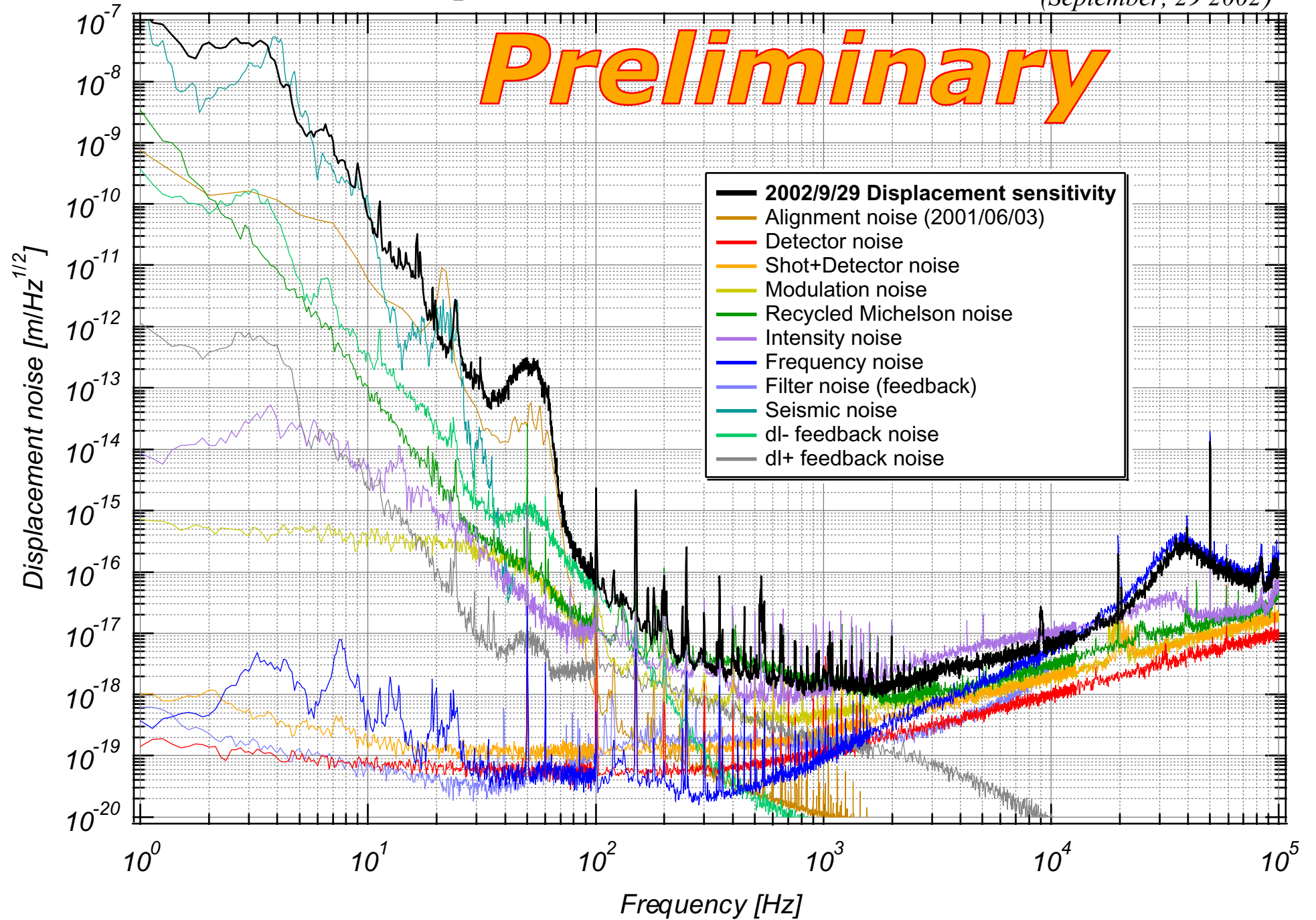
干渉計出力
信号



Displacement noise level of TAMA300

(September, 29 2002)

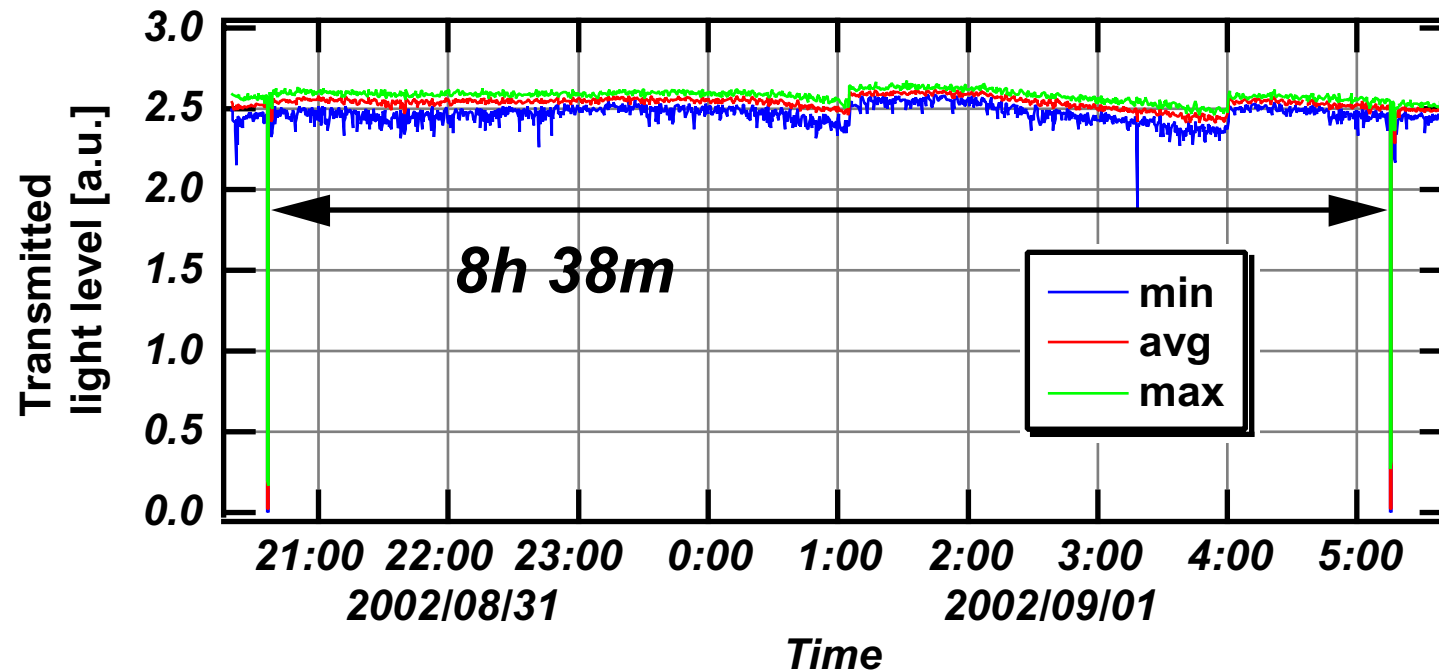
Preliminary



Stability

- リサイクリングによって感度も高まるが、光学構成が複雑になるため、安定度が損なわれる

干渉計内部光量が鏡の姿勢の変動に敏感になる



現在までに8時間40分の連続動作が得られている
(リサイクリングなしでの記録は24時間50分)

国際同時観測

- 複数の大型検出器による同時観測

- ◆ S1 (Scientific run 1)

2002/8/22-2002/9/9

LIGOとGEOによる同時観測

TAMAも部分的に参加

- ◆ S2 (Scientific run 2)

2003/2/14-2002/4/14

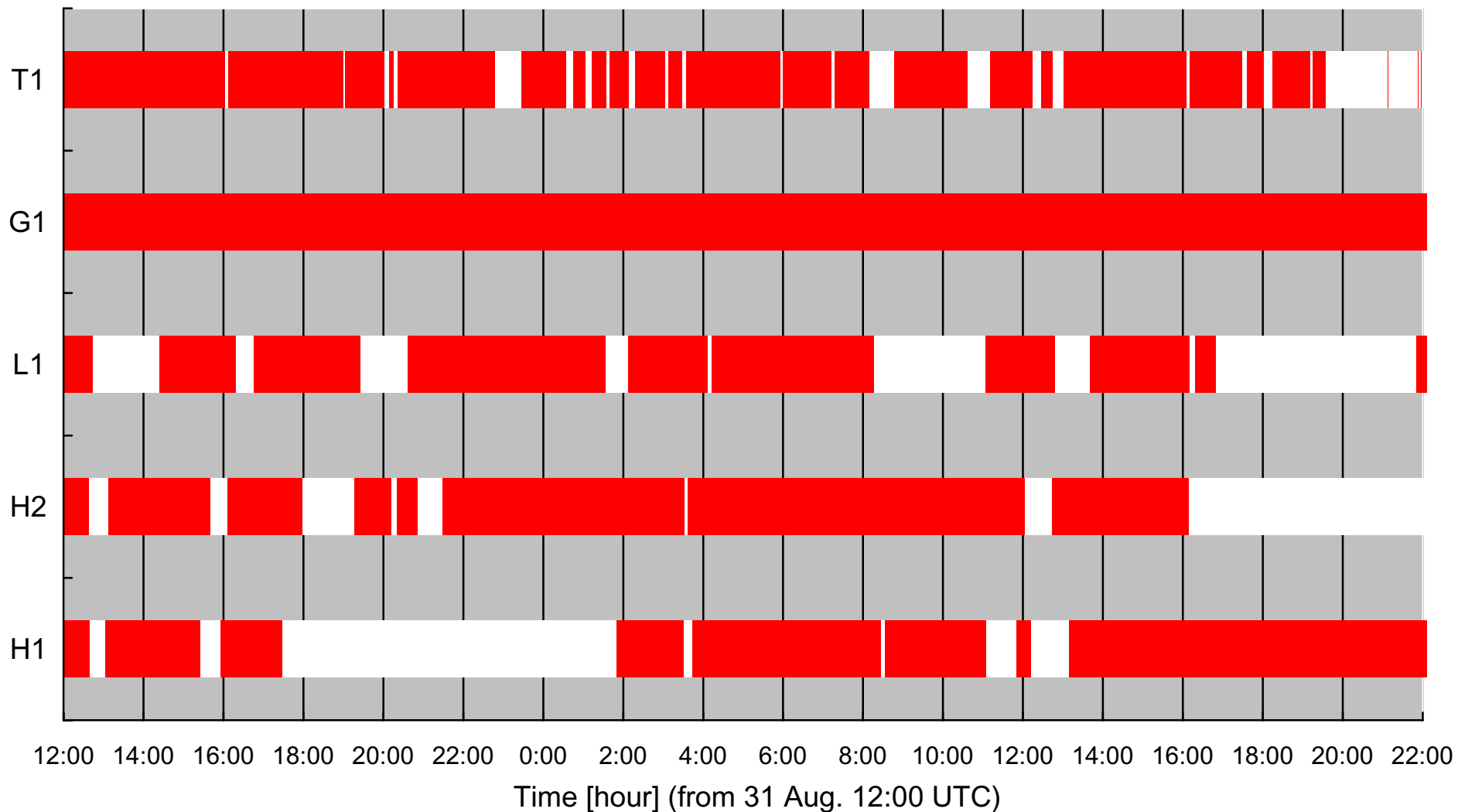
LIGO+GEO+TAMAによる同時観測

S1 & DT7

Common Lock of 5 interferometers: 9hrs 50min

Longest Common Lock stretch: 2hrs 24min

Coincidence Run (TAMA300, LIGO, and GEO600)



- **Summary**

Summary

- 干渉計型重力波検出器 **TAMA300**

これまでに7回の観測 ⇒ DT6: 50日, 1000時間以上のデータ

リサイクリング実験 ⇒ 感度の向上

$$h = 3.3 \times 10^{-21} / \sqrt{\text{Hz}} @ 1.5\text{kHz}$$

- **Data Analysis using DT6 data**

Binary inspirals

Burst search

Continuous wave search, etc...

- もうまもなく...

LIGO・GEOとの長期同時観測

Data Taking 8 シフトメンバー募集

R. Takahashi

● Data Taking 8

TAMA300の観測データの取得
LIGOおよびGEOとの共同観測

● 実施期間

2/14(Fri) 23:00(JST) ~ 4/15(Tue) 7:00 (JST)

● シフト体制

1日3交代制 時間割 (23:00~7:00, 7:00~15:00, 15:00~23:00)

コアメンバーおよびサブメンバーの2人で担当

コアメンバー(20名)

干渉計の調整・操作

サブメンバー(のべ178名)

干渉計の監視・記録

サブメンバーを募集します(旅費の手当てあります)

- 3/16まで: 空きがある時間帯のシフト
- 3/16以降: 希望日時を調査(2/16締め切り)

連絡先を記名してもらえれば、詳細を連絡さしあげます