



河邊径太 (KAWABE, Keita), LIGO Hanford Observatory
on behalf of LIGO Scientific Collaboration

DCC: LIGO-G060164-00-D

- 最近の LIGO の性能向上は大変に exciting かつ大変に encouraging
 - 既に目標感度 ($10^{-22}/\text{sqrtHz}$, 100Hz BW) を達成
 - Duty cycle も着実に改善
 - 1 年分のデータ取得に向け、Science Run の最中
- 次 (Post-S5、Advanced LIGO) のプラン
- LIGO の強み = 限界：観測所は 2 箇所だけ
 - GW の Science を実りあるものにするために国際協力が不可欠!!

目次： 検出器の性能の観点から

- LIGO とは
 - 歴史等
 - Science
- S5: LIGO の現状
 - 現状：感度良、Duty cycle 要改善
 - S5 の目標
 - LIGO の技術：S4 後に改良された事
- LIGO のこれから
 - Post-S5 Initial LIGO, Advanced LIGO
 - 国際協力



LIGO とは

- Funding: NSF
- Operation: Caltech-MIT
- 2つの観測所、3つの検出器
 - Hanford (LHO), 4km と 2km, (ローカル 30+ 名)
 - Livingston (LLO), 4km, (ローカル 30+ 名)
 - (観測所以外の CIT/MIT スタッフ百数十名)
 - R&D: 40m プロトタイプ等様々
- LIGO Scientific Collaboration メンバー (世界中に約 500 名) による共同利用

LIGO Observatories: 2つの観測所、3つの検出器

LIGO Hanford Observatory (LHO)

H1 : 4 km arms

H2 : 2 km arms

3000km, 10 ms

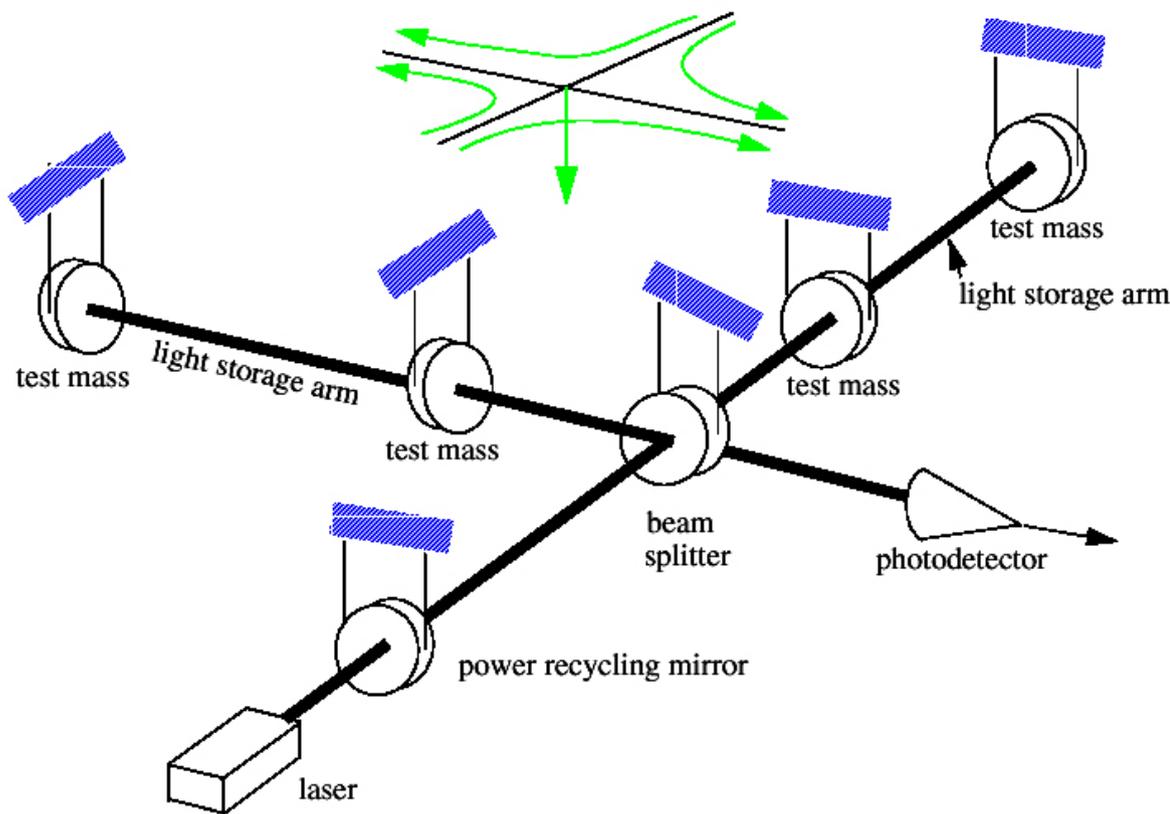
LIGO Livingston Observatory (LLO)

L1 : 4 km arms

● Adapted from “The Blue Marble: Land Surface, Ocean Color and Sea Ice” at visibleearth.nasa.gov

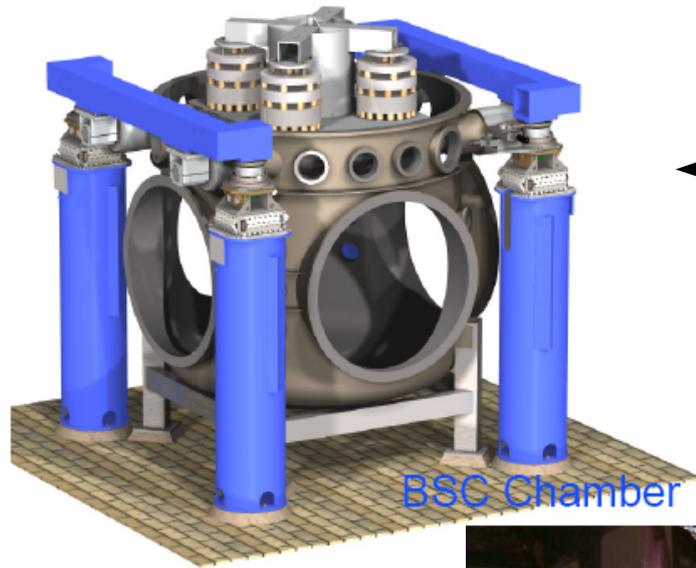
● NASA Goddard Space Flight Center Image by Reto Stöckli (land surface, shallow water, clouds). Enhancements by Robert Simmon (ocean color, compositing, 3D globes, animation). Data and technical support: MODIS Land Group; MODIS Science Data Support Team; MODIS Atmosphere Group; MODIS Ocean Group Additional data: USGS EROS Data Center (topography); USGS Terrestrial Remote Sensing Flagstaff Field Center (Antarctica); Defense Meteorological Satellite Program (city lights).

中身はこんなもの



- Power-recycled,
- Michelson IFO,
- Fabry-Perot arms
– 4km (or 2km)

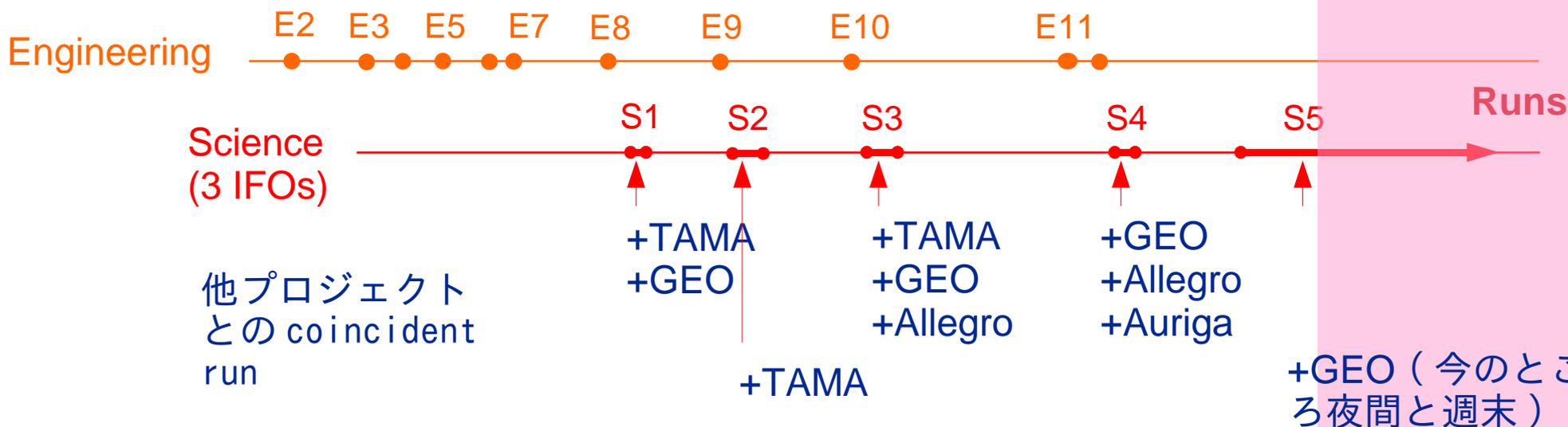
防振 / 懸架



Vibration-isolated chambers using stack

Core Optics Suspension





- 4 度の Science Run (S1-S4) を終了
 - 解析進行中のもの多数
 - 解析終了したもの多数
 - 他プロジェクトとの coincidence run (incl. TAMA-LIGO for S1, S2 and S3)
- 5 度目の Science Run (S5) 進行中
 - Nov/04/2005 start
 - 1 年分の 3-IFO coincidence データ取得 (を目標)
 - 既に GEO(英独) が夜間 / 週末モードで参入

解析 paper: S1

(as of 29/Mar/2006)

*“Setting upper limits on the strength of periodic gravitational waves using the first science data from the GEO600 and LIGO detectors”, Phys. Rev. D **69**, 082004 (2004)*

*“First upper limits from LIGO on gravitational wave bursts”, Phys. Rev. D **69**, 102001 (2004)*

*“Analysis of LIGO data for gravitational waves from binary neutron stars”, Phys. Rev. D **69**, 122001 (2004)*

*“Analysis of first LIGO science data for stochastic gravitational waves”, Phys. Rev. D **69**, 122004 (2004)*

“Detector Description and Performance for the First Coincidence Observations Between LIGO and GEO”, Nucl. Instrum. Meth., A517 (2004) 154-179

解析 paper: S2

(as of 29/Mar/2006)

*“Limits on gravitational wave emission from selected pulsars using LIGO data”, Phys. Rev. Lett. **94**, 181103 (2005)*

*“A search for gravitational waves associated with the gamma ray burst GRB030329 using the LIGO detectors”, Phys. Rev. D **72**, 042002 (2005)*

*“Upper limits on gravitational wave bursts in LIGO’s second science run”, Phys. Rev. D **72**, 062001 (2005)*

*“Search for gravitational waves from galactic and extra-galactic binary neutron stars”, Phys. Rev. D. **72**, 082001 (2005)*

*“Search for gravitational waves from primordial black hole binary Coalescences in the Galactic Halo”, Phys. Rev. D. **72**, 082002 (2005)*

*“Upper limits from the LIGO and TAMA detectors on the rate of gravitational-wave bursts”, Phys. Rev. D. **72**, 122004 (2005)*

*“First all-sky upper limits from LIGO on the strength of periodic gravitational waves using the Hough transform”, Phys. Rev. D **72**, 102004 (2005).*

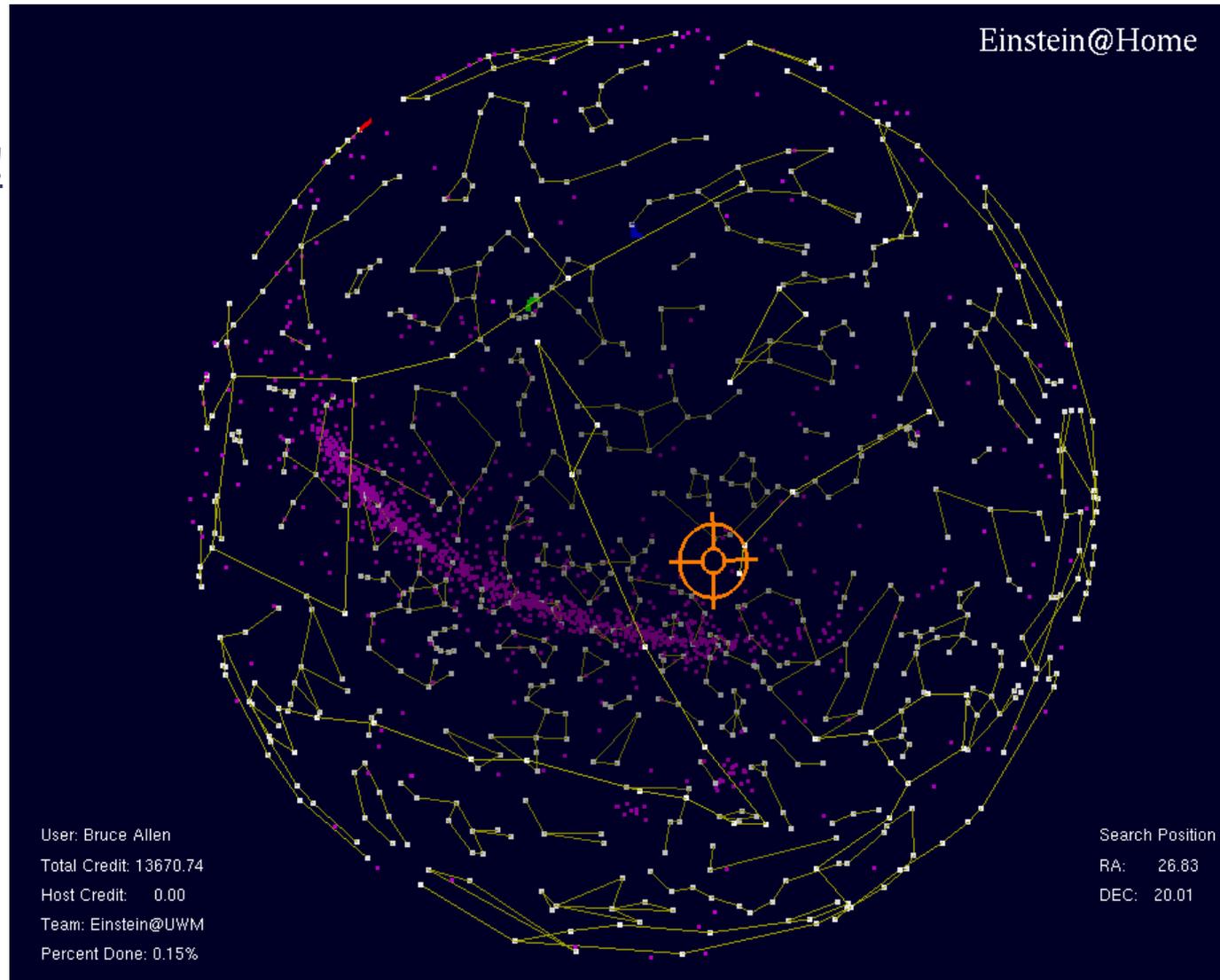


解析 paper: S3

(as of 29/Mar/2006)

“Upper Limits on a Stochastic Background of Gravitational Waves”,
Phys. Rev. Lett. 95, 221101 (2005)

- SETI の技術を応用した S3/S4 データ解析
- 約 40000 の計算機、約 20Tflops
- Outreach という意味でも重要

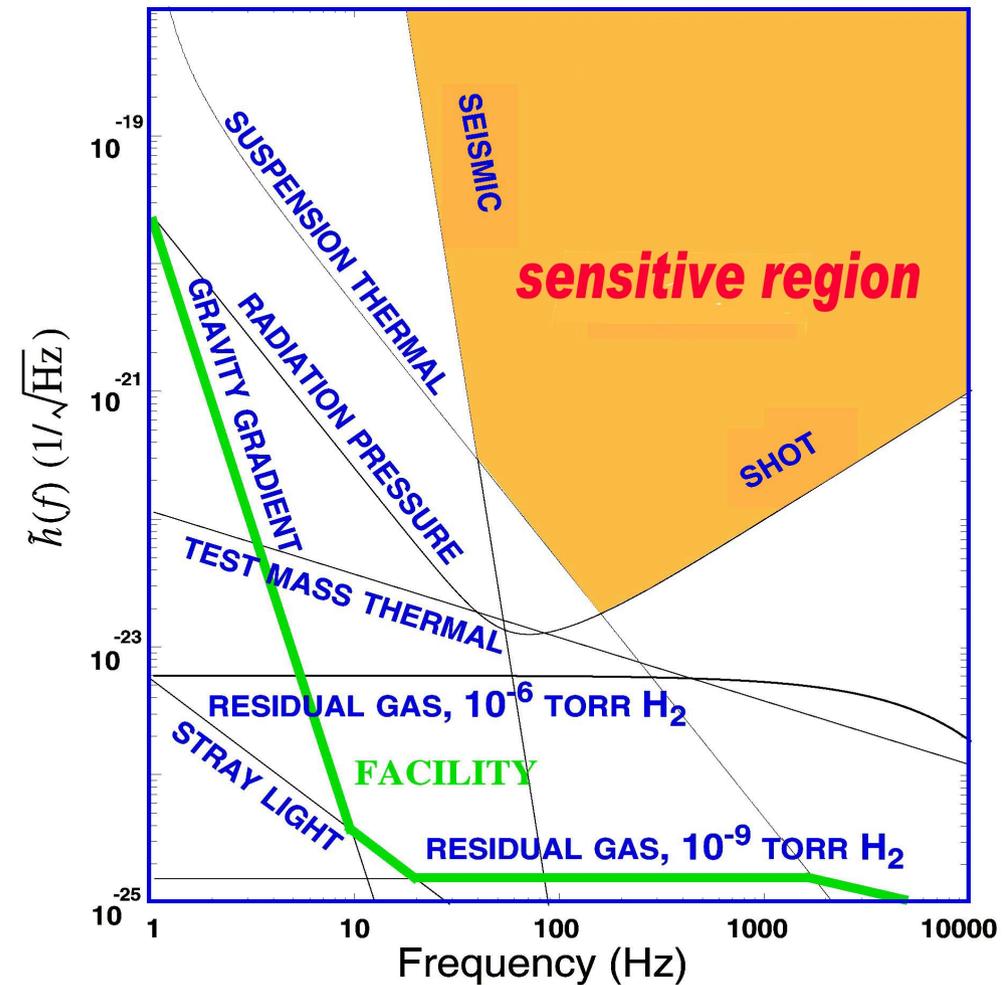


- BOINC クライアントをダウンロード (Win, OSX, Linux/X86, Solaris/Sparc)
 - <http://boinc.berkeley.edu/download.php>
- インストール、起動する
- プロジェクトの URI として Einstein@Home を指定
 - <http://einstein.phys.uwm.edu/>



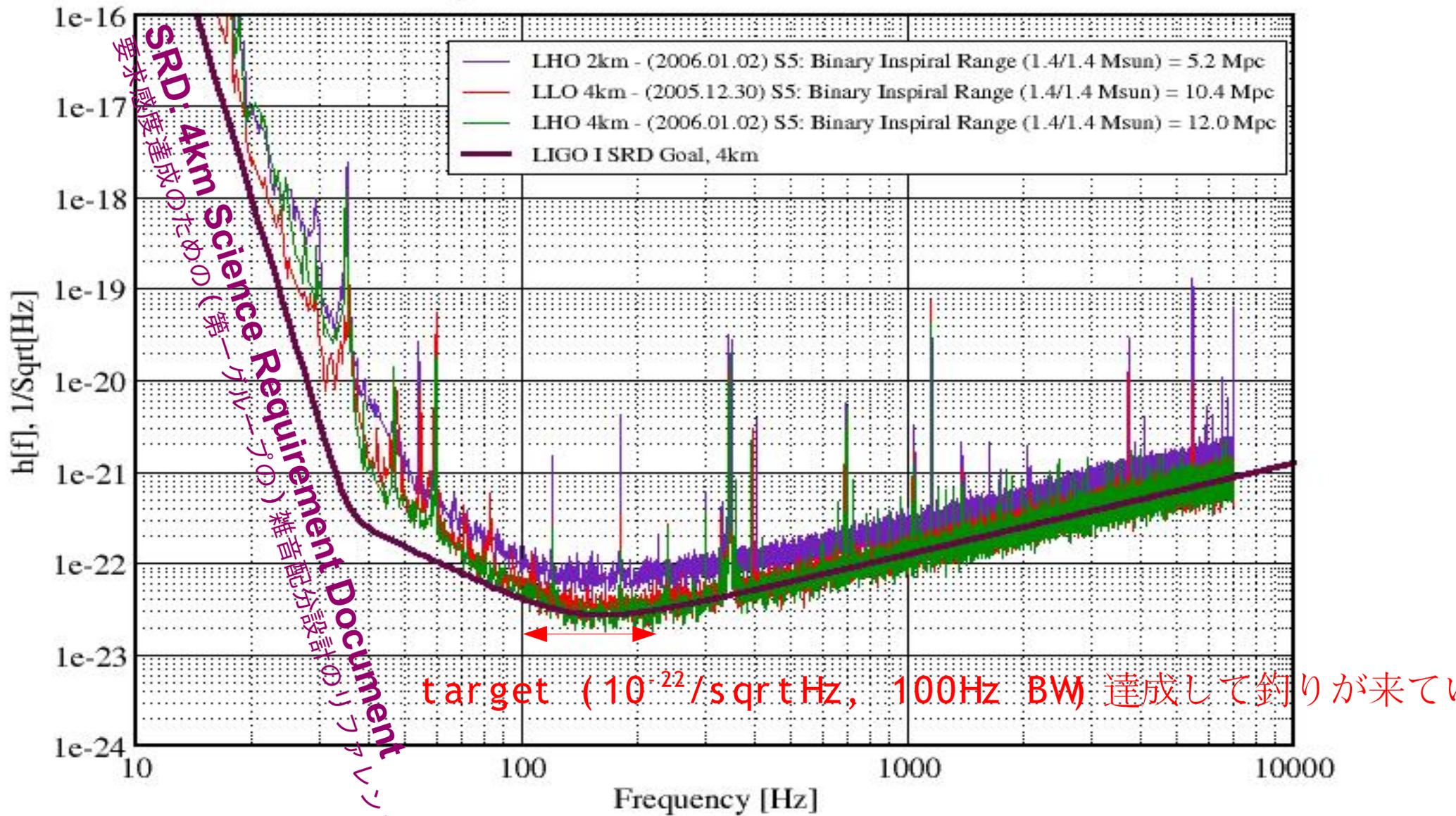
S5 と LIGO の感度

- 第一グループ：設計パラメタとして存在が許される雑音
 - 光の散射雑音
 - 鏡 / 懸架の熱運動
 - 地面振動
- 第二グループ：それ以外のノイズ (laser、エレクトロニクス、機械もの etc.)
- Commissioning (i.e. 作る / 動かす) 過程で雑音を評価、第一グループを設計に近付け、第二グループを全て第一グループの下に押し込める



Best Strain Sensitivities for the LIGO Interferometers

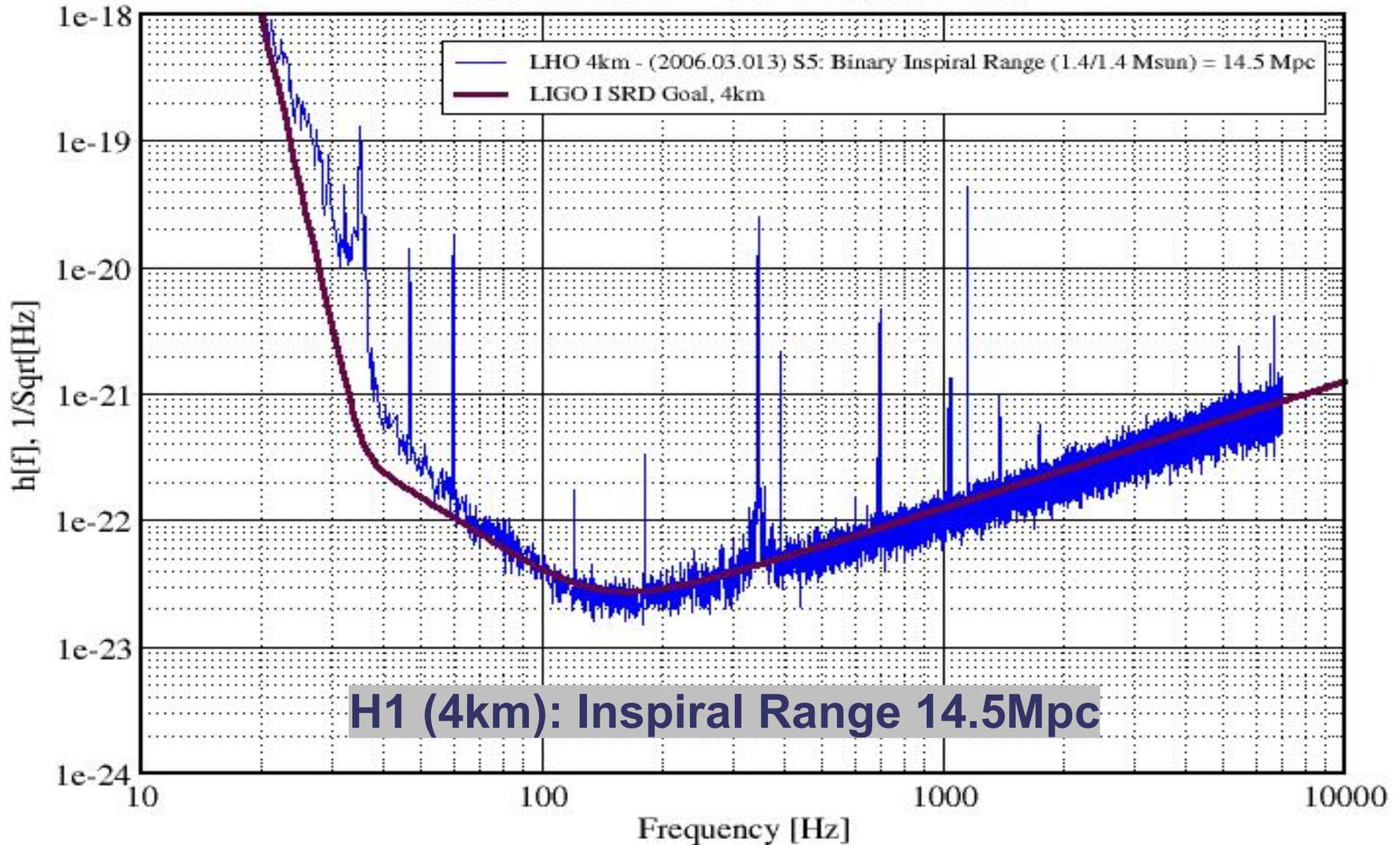
Early S5 Performance LIGO-G060010-01-Z



S5: きっちり動いている!

Strain Sensitivity for the LIGO Hanford 4km Interferometer

S5 Performance LIGO-G060051-00-Z

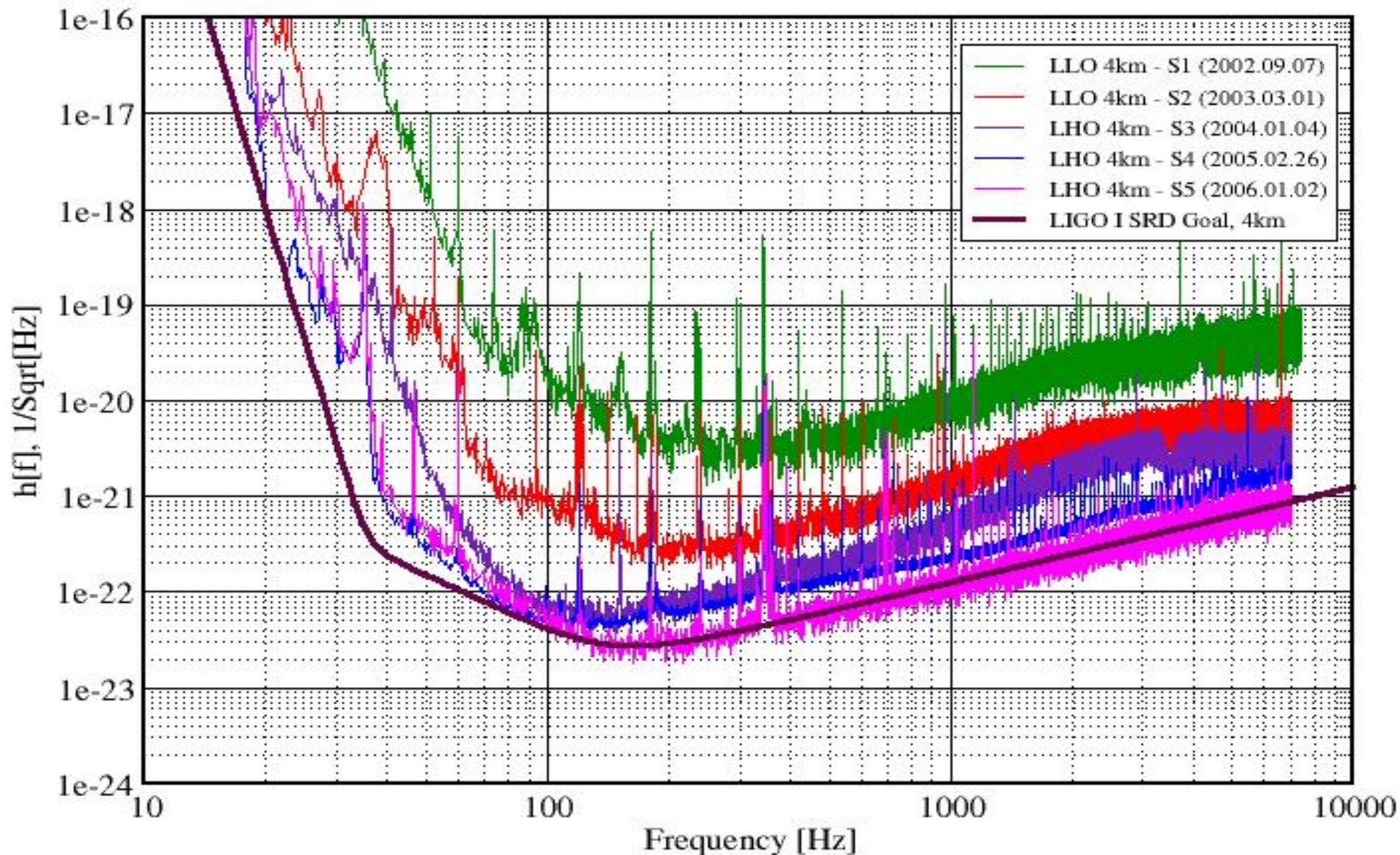


最近の更なる改善 (LHO Commissioning Break)

Best Strain Sensivities for the LIGO Interferometers

Comparisons among S1 - S5 Runs

LIGO-G060009-01-Z



感度改善の歴史

- S4: 8.3/ 7.4/ 3.5Mpc (H1/L1/H2)
- Initial S5: 12.0/ 10.4/ 5.2Mpc
- S5 commissioning break 後 : H1 14.5Mpc
- Virgo cluster 視野に

- 最低 1 年分の 3-IFO coincidence
- Duty cycle それぞれ 85% 目標 (3-way 70%)
- 毎週火曜、4 時間 (8:00-12:00) のメンテナンス
- それ以外にいじるのは、原則として検出器が動かない様な場合のみ
- 必要なら 2 週程度の “Commissioning break” を適宜挟み、感度と安定性の両方を改善する
 - LHO: Feb/2006 最初の Commissioning break、感度と安定性に大きな改善
 - LLO: First commissioning break Apr.3-14/2006

- 感度は既にかなり良い
- 1年間の3台同時観測, 目標 Duty cycle 85% each (3-way 70%)
 - つまり、うまく行けば 1.5 年
- Duty cycle, Mar14-20
 - H1, H2 >80%
 - L1 about 56%
 - 要改善

Run	S2	S3	S4	S5 Target
L1	37%	22%	75%	85%
H1	74%	69%	81%	85%
H2	58%	63%	81%	85%
3-way	22%	16%	57%	70%

Post-S4 & S5 Commissioning break 改善点と学んだ事 1

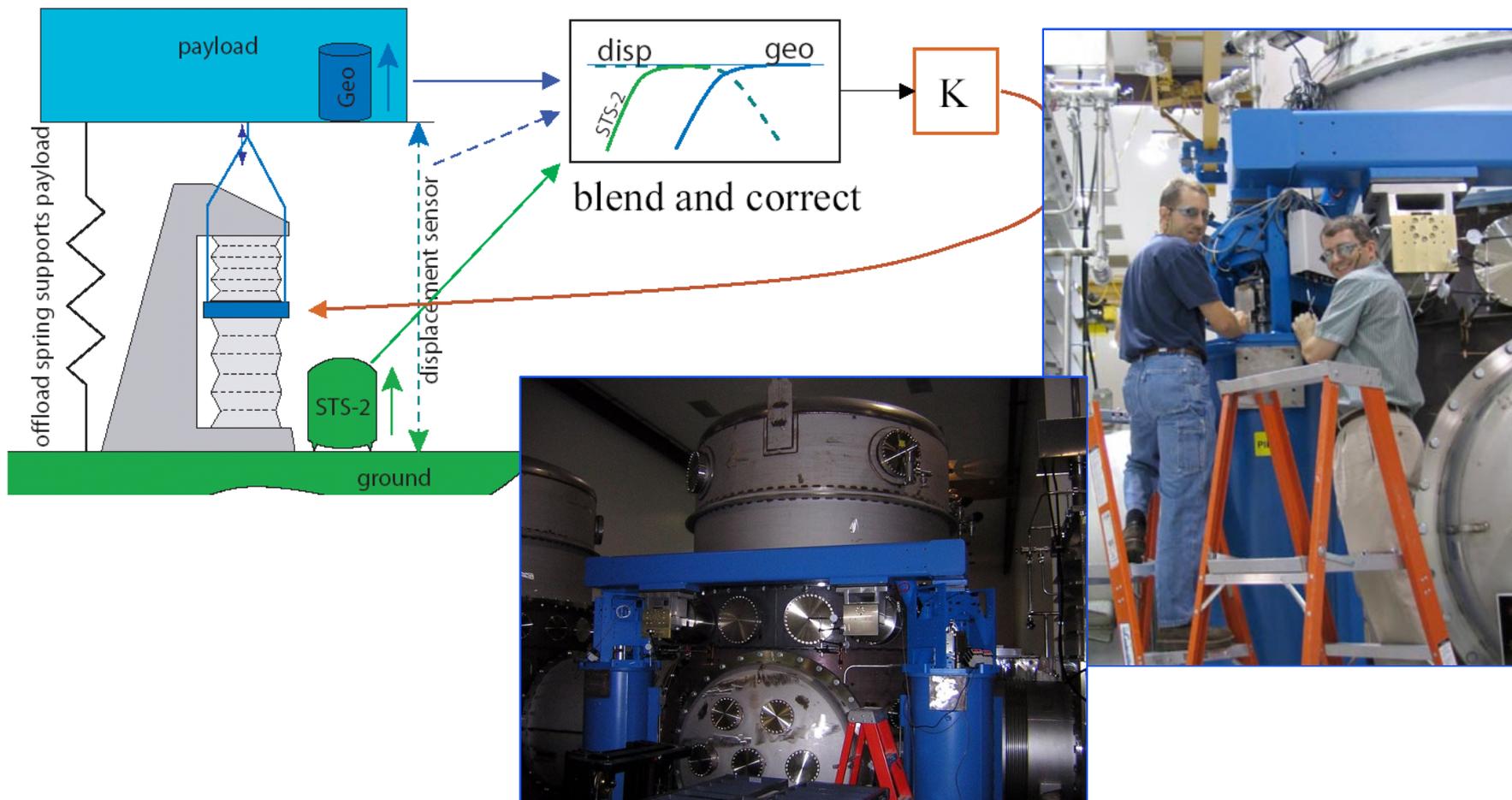
- L1: HEPI (低周波防振) による Duty cycle 改善
 - Early implementation of AdLIGO technique
- All: Laser パワーを上げる (2-3W->6W レベル for 4km)
- H1: 鏡の光吸収の低減 (鏡交換清掃)
- All: Thermal Compensation System (鏡の吸収による熱レンズ効果の補正) の改良
 - Early implementation of AdLIGO technique

Post-S4 & S5 Commissioning break 改善点と学んだ事 2

- All: Angular Sensing/Control refinement
 - 高帯域化
 - マトリクス対角化
 - Length とのデカプリング強化
- H1, L1: ASPD 「焼け」の研究と対策
- All: Automated Noise Budget

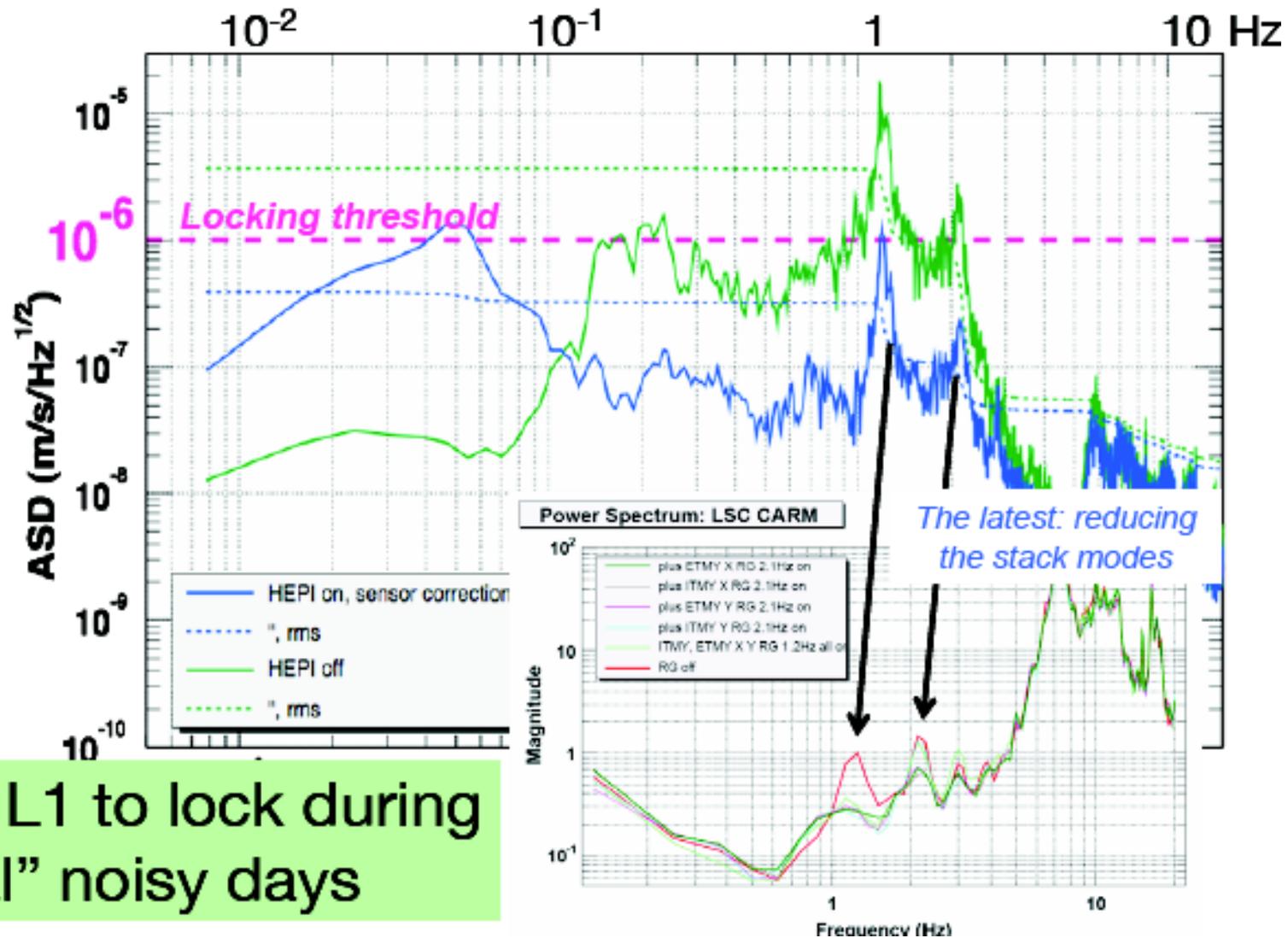
..... 等等多数（数え切れません）

HEPI: Hydraulic External Pre-Isolator



Early implementation of AdLIGO technique

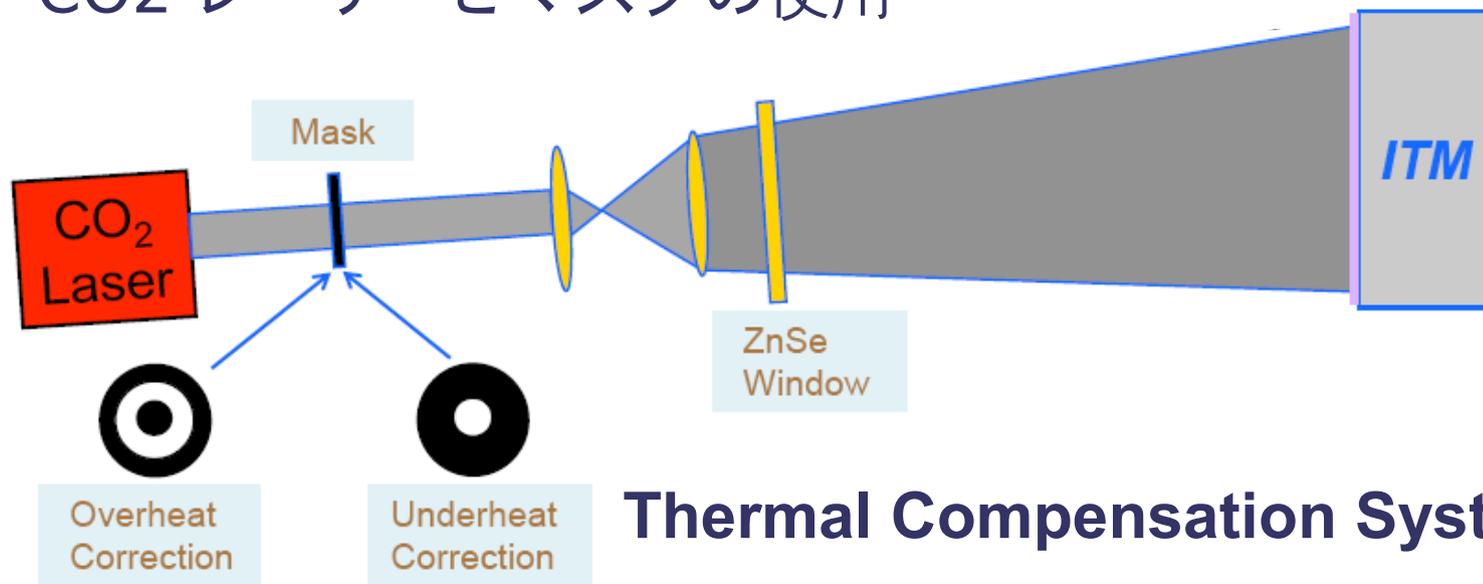
HEPI performance



Allows L1 to lock during "typical" noisy days

TCS: Thermal Compensation System (ALL)

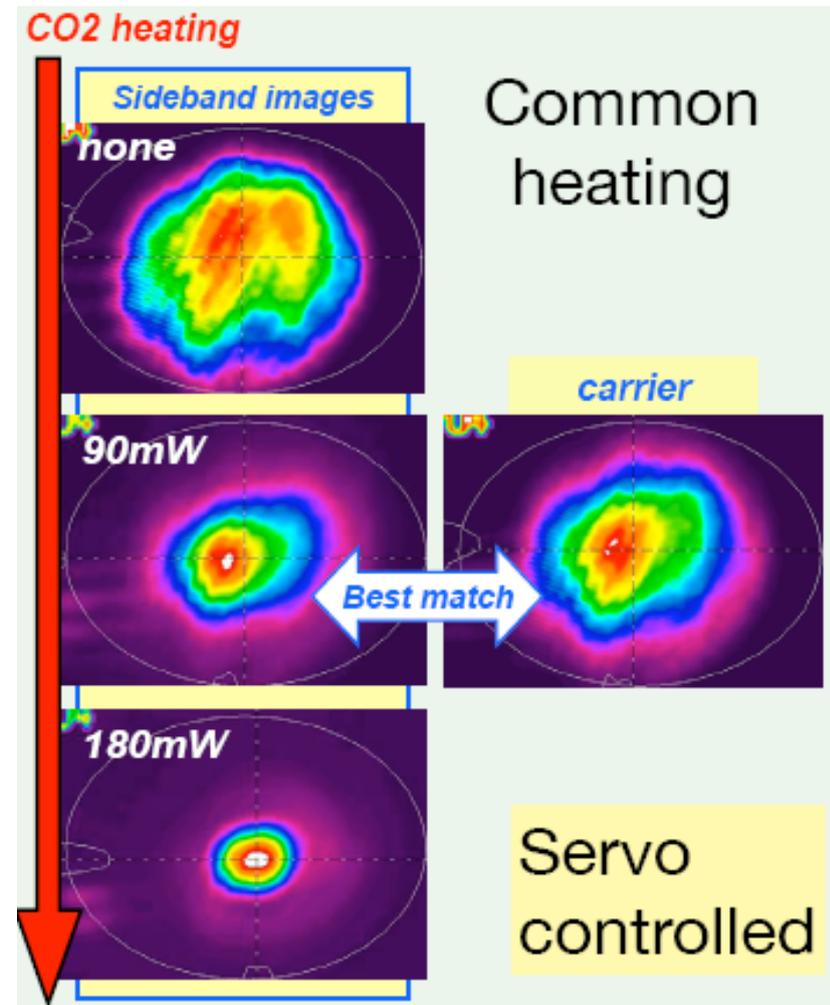
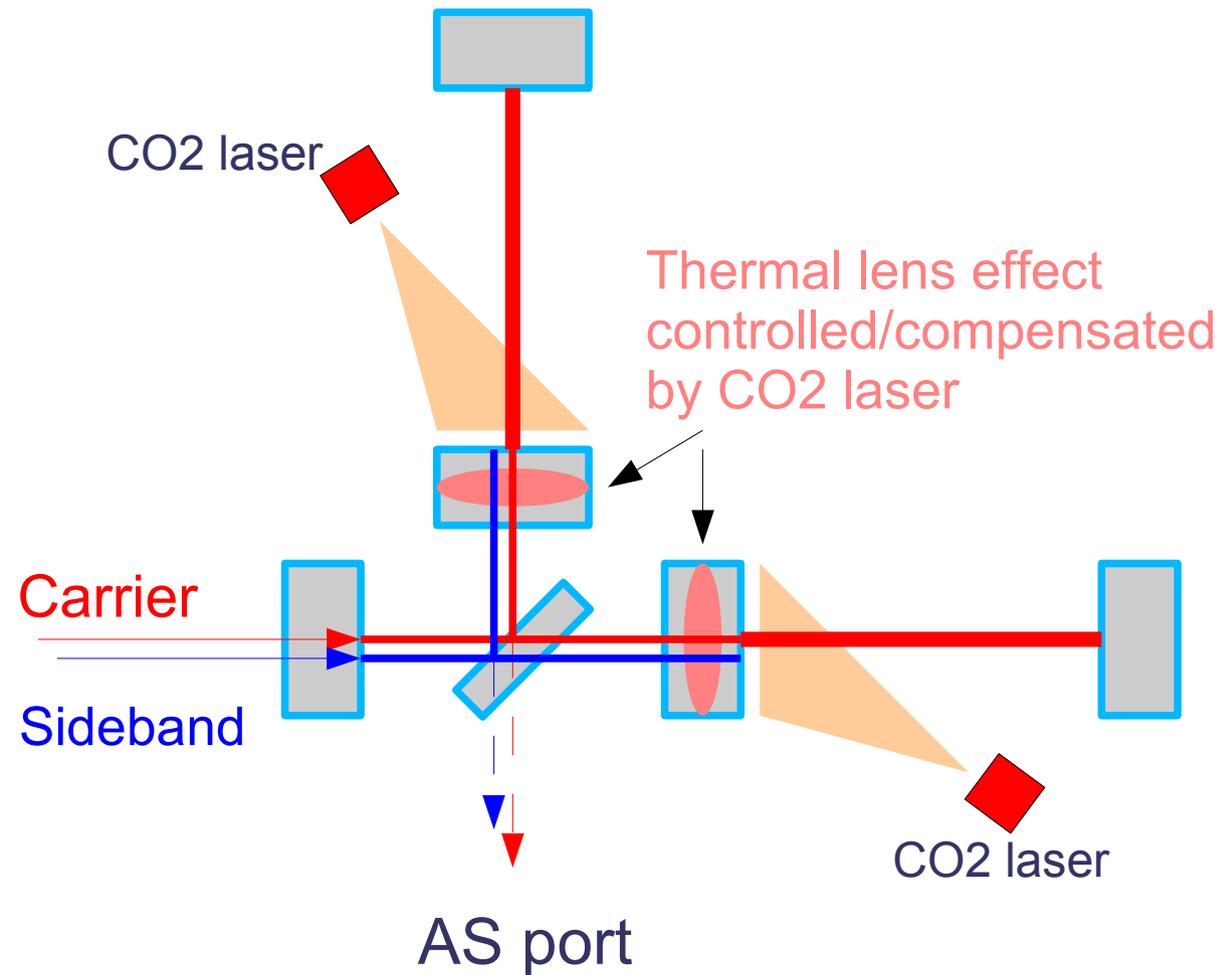
- 大きなレーザーパワー = 大きな吸収 = 熱レンズ効果
 - Carrier と Sideband の空間モードの不一致
 - 上下 Sideband の空間モードおよび振幅の不一致
- 適当な加熱パターンによる熱レンズ効果補正
 - CO₂ レーザーとマスクの使用



Thermal Compensation System (TCS)

Early implementation of AdLIGO technique

Thermal lens effect and TCS



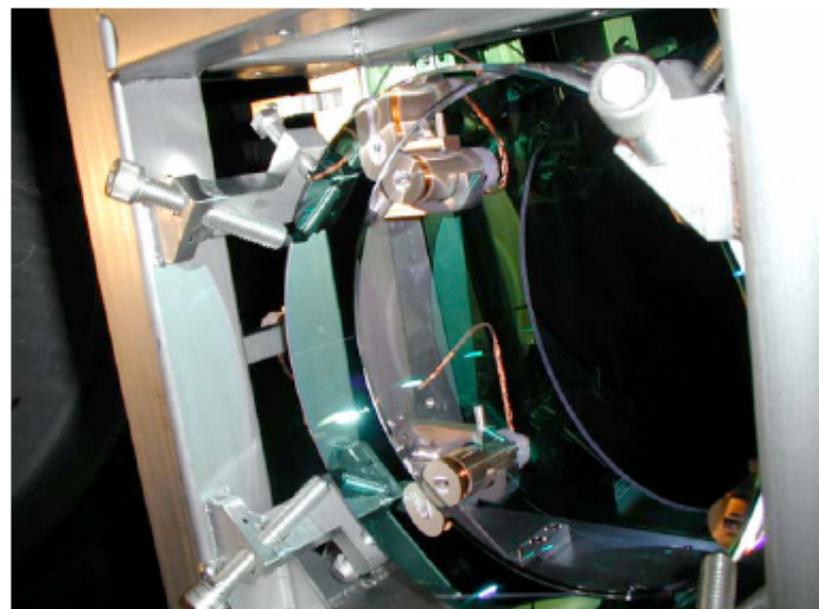
H1:ITM(BSに近い側の鏡)の光吸収が 大き過ぎた!

- TCS は H2 と L1 では大変良く働いたが ...
- S4: Laser Power 3W for H1
 - 非常に大きな吸収、補正のための CO2 レーザーパワーが **1.5W(!!)**
 - 1 μ m のレーザーと CO2 レーザーとを同時に大きくする作戦は失敗

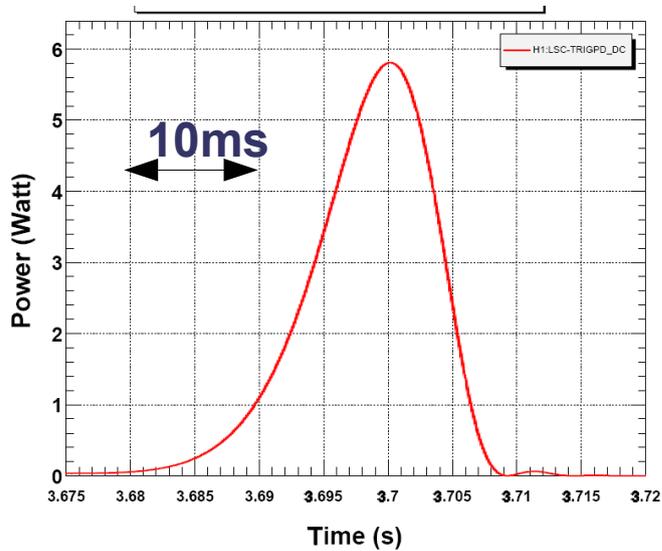
- In-situ 吸収分析の努力
 - Beam size, g-factor, TCS power
- 交換用鏡の詳細な事前測定
- June 2005, H1 ITMX 交換、ITMY 清掃

	ITMX	ITMY
Before	35 mW/W	14 mW/W
After	< 3 mW/W	3 mW/W

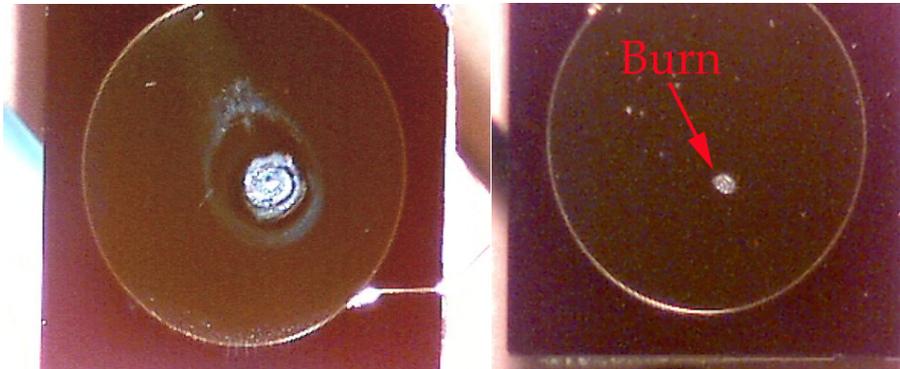
大成功！



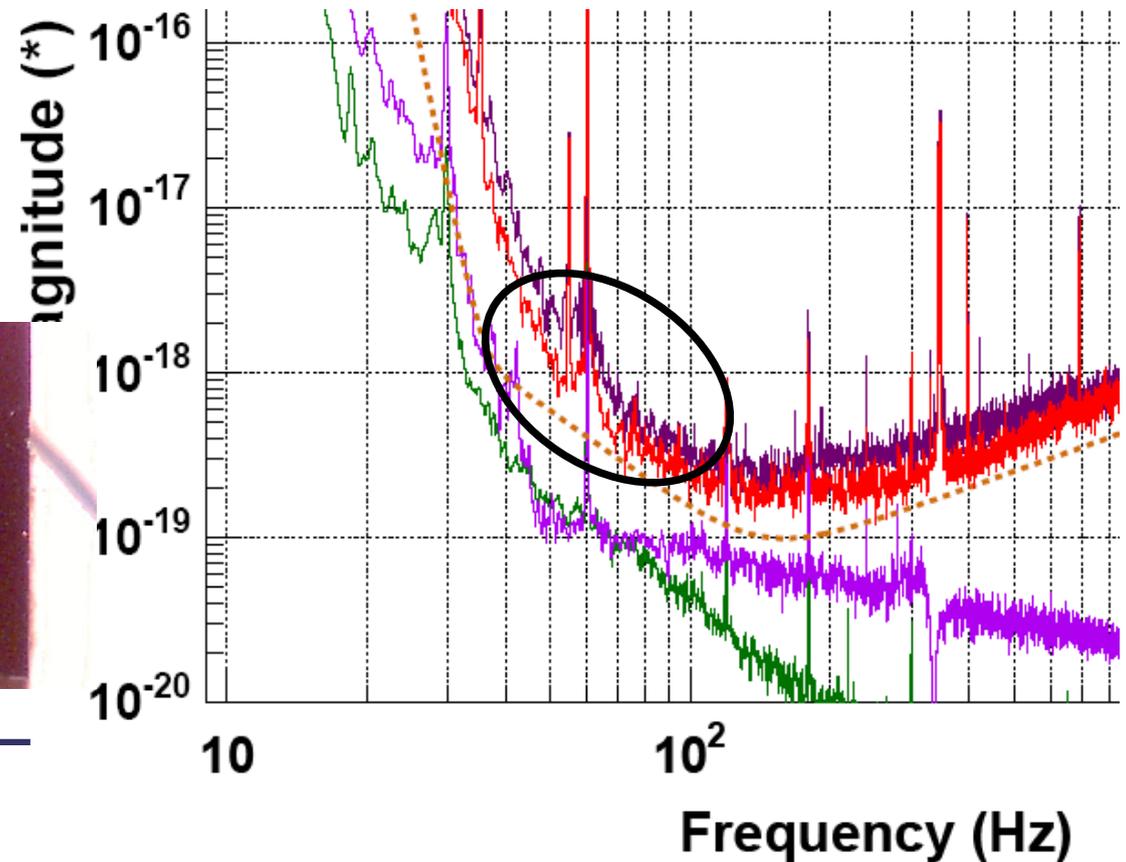
PD 焼けと雑音



Lock Loss とともに大きな光パワーがダイオードを直撃して破損 / 部分劣化。部分劣化の場合雑音が増す事がある



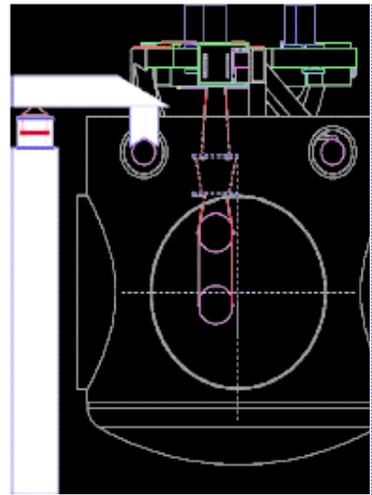
- 各所に高速の光シャッター
- トリガーレベルの最適化



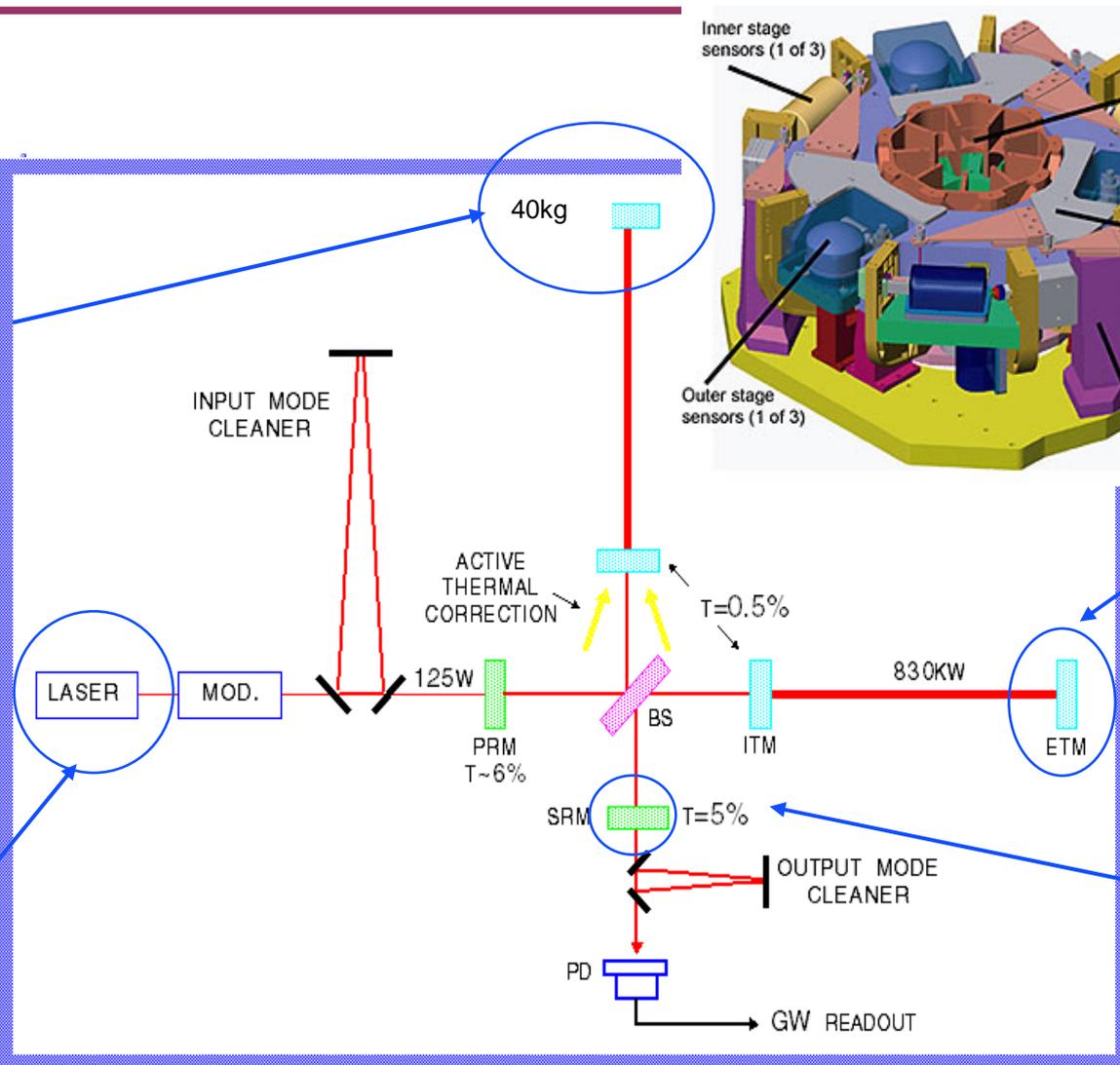
- 角度制御は安定運転のために大変重要
 - 制御の広帯域化、対角化、Length とのデカップリング
- Larger power, larger junk, smaller head room (i.e. saturation)
- Even higher power (further shot noise reduction)?
 - PD を増やす事が必要か？

- 既に目標感度以上を達成
- 完全に放置しとけばすむというレベルでは無い: Commissioning Break を必要に応じて
- LHO: 最初の Commissioning Break 後、Duty cycle は H1/H2 とともに 85% に近づきつつある
- LLO: Commissioning Break Apr2006 予定

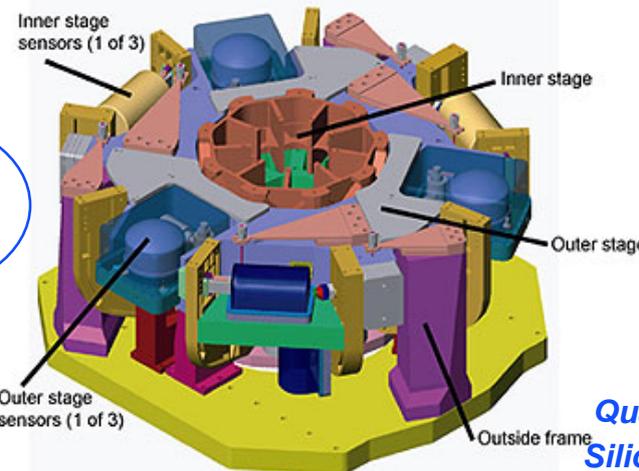
- During S5
 - L1 commissioning break (Apr 2006)
- Post-S5 update before AdLIGO
 - Output Mode Cleaner etc.
- 2010 shutdown for AdLIGO upgrade
- AdLIGO?
 - 2005 NSF review: S5 前に目標感度に到達した事もあり、好評



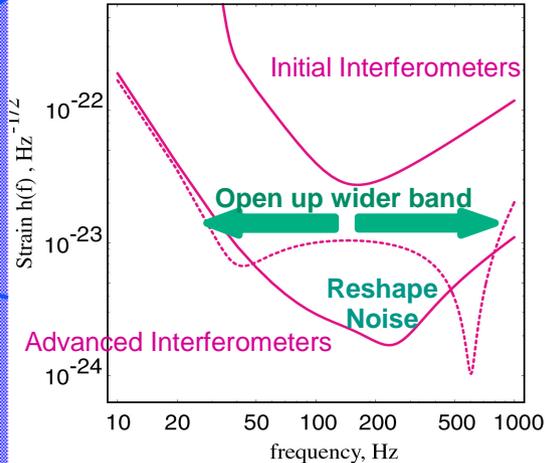
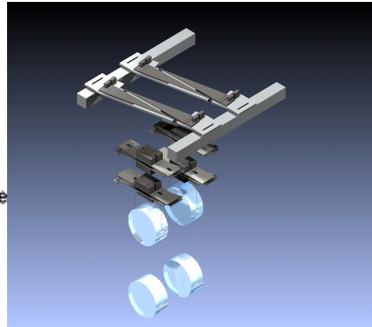
Active vibration isolation systems



High power laser (180W)



Quadruple pendulum:
Silica optics, welded to silica suspension fibers



Advanced interferometry
Signal recycling

複数台の検出器のご利益

- 検出 confidence 向上
- ソース位置情報の確定
- 重力波偏波情報の確定

LIGO は 2 箇所

- 検出器の性能が上がれば上がるほど、より良い天文 / 物理のために国際的なネットワークの必要性和モチベーションが高まる

GW 地上検出器ネットワーク 現状と未来 (?)

AdLIGO, 二箇所

EGO (?)

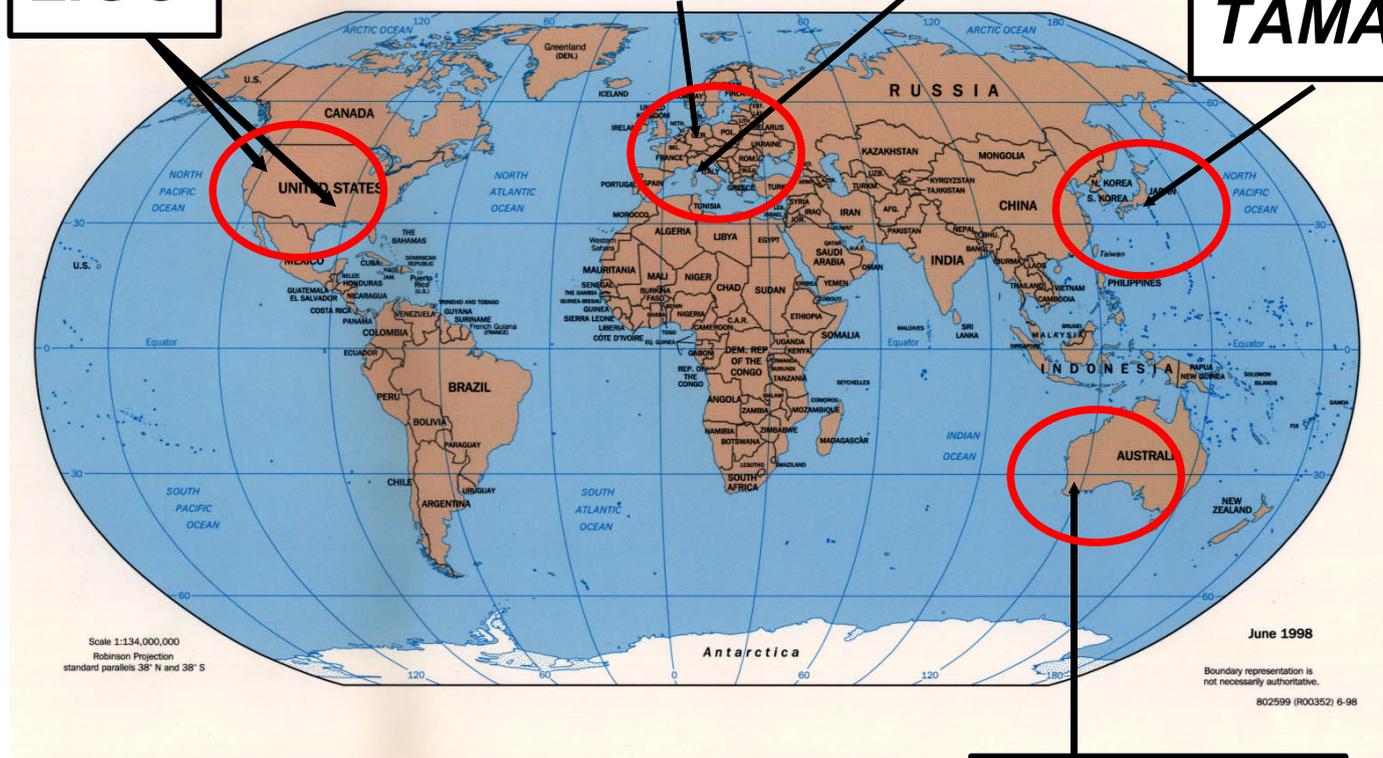
LCGT(?)

LIGO

GEO600

Virgo

TAMA300



AIGO(80m)

AIGO(3k?)

- 最近の LIGO の性能向上は大変に exciting かつ大変に encouraging
 - 既に目標感度 ($10^{-22}/\text{sqrtHz}$, 100Hz BW) を達成
 - Duty cycle も着実に改善
 - 1 年分のデータ取得に向け、Science Run の最中
- 次 (Post-S5、Advanced LIGO) のプラン
- LIGO の強み = 限界：観測所は 2 箇所 (だけ)
 - GW の Science を実りあるものにするために国際協力を !!

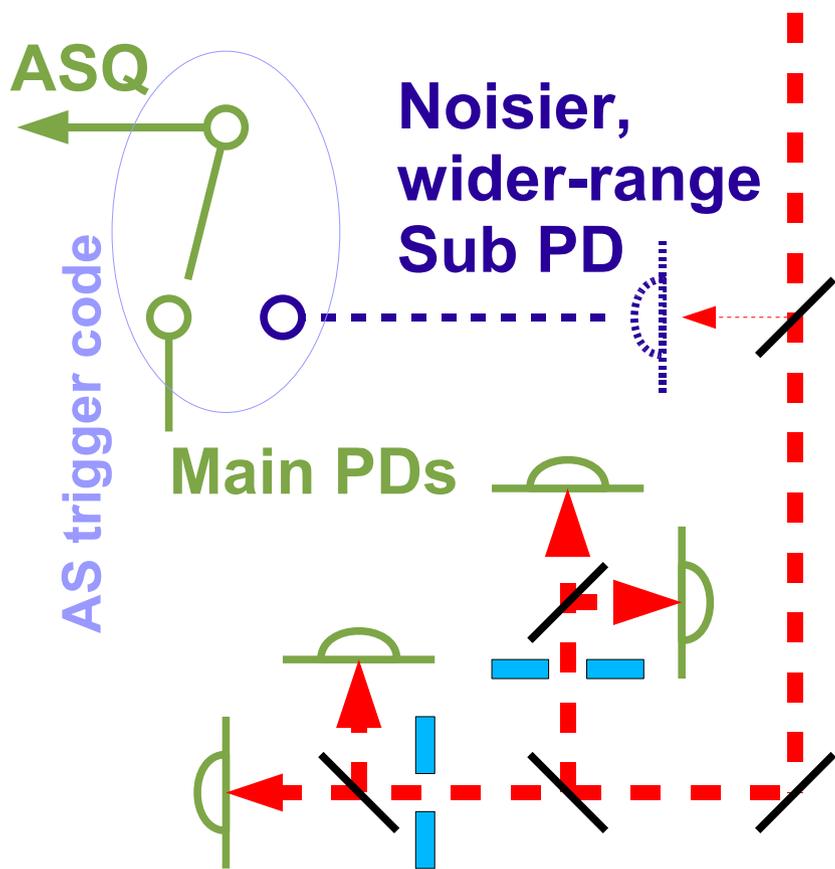
- H1/L1: Refl-beam position stabilization
 - Heat-induced deflection in Faraday
 - 2xPZT 鏡
- All: RF LO (LO そのものと分配システムの雑音低減)
- All: MICH/PRC: エレキもの、光量、変調指数等のチューニングによる低雑音化
- H1/H2: 音とのカップリングの低減
 - 防音室 (光学テーブルを遮音)
 - H2 AS テーブルを浮かせる
 - x5 低減

- All: 強度 / 周波数安定化の改善
- H1: Junk signal カップリング低減
- All: 腕透過光の散乱対策強化
- LHO: 環境雑音測定と低減
 - 空調装置の空気流量の最適化 (LHO)
 - CO2 レーザー (TCS) の強度と水冷ポンプ
- All: AS Trigger: ロックを落さないための PD 切替え

- 一度干渉計が「落ちる」と、最低でも15分程度、下手をすると1時間以上を無駄にする
- 通常運転時の光ダイオードは低雑音だが当然レンジも狭い
- 大きな外乱が入った場合、とりあえずその瞬間のデータはあきらめ、雑音が大きいがレンジの広いダイオードに瞬時に切替える

AS Trigger の概念図

通常時 (Main PDs active)



異常振幅検出時 (Sub PD active)

