

2005. 1. 6
将来計画シンポ

LCGT計画の現状と見通しについて

黒田和明

&

LCGT Collaboration

これまで見つかっている連星パルサー (ただし100億年以内に合体するもの)

	P(ms)	Pb(hr)	e	M_{sun}	τ_c	τ_{GW} (Myr)	Rate
• J0737-3039A	22.70	2.45	0.088	2.58	210	87 (2003)	
• J0737-3039B	2773	2.45	0.088	2.58	50	87 (2004)	10^{-5}
• B1534+12	37.90	10.10	0.274	2.75	248	50 2690(1990)	10^{-6}
• J1756-2251	28.46	7.67	0.181	2.57	444	1690 (2004)	
• B1913+16	59.03	7.75	0.617	2.83	108	310 (1975)	10^{-7}
• B2127+11C	30.53	8.04	0.681	2.71	969	220 (1990)	
• J1141-6545*	393.9	4.74	0.172	2.30	1.4	590 (2000)	

*は一方が白色矮星

要求要旨

- 重力波は一般相対性理論で予言される時空のひずみ波
- アインシュタインの一般相対性理論の検証
- 高密度天体や物質に覆われた銀河中心で起こる現象など重力波でしか観測できない天文現象を捉える新しい観測手段の確立
- 信号波形から重力波源までの距離推定が可能
- 雑音のない理想的な検出器3台で重力波源位置の決定
- 現在検出可能とされる乙女座銀河団で発生イベントは数百年に1回程度
- 天文学として意味のある観測を行うにはもう一桁の感度向上が必須
- TAMAの基線長を一桁スケールアップ、レーザー鏡低温化によるkmスケールの低温鏡重力波望遠鏡LCGTの提案
- LCGTの感度はTAMAを2桁程度、また、LIGO計画、VIRGO計画などで期待される感度を一桁程度上回る
- 予想される重力波イベント発生率によれば1年で0.02から20回
- 世界で初めての重力波直接検出を目指す
- 計画建設に5年、目標感度達成のための調整に2年

期待される成果(1)

- **2重中性子星の質量の決定**
 - 合体時の最後の3分間の波形観測データを理論的なテンプレート波形と比較することにより、両星の質量、角運動量が決まる。パルサー観測では数年以上の時間スケールの観測に匹敵する。
- **2重中性子星の半径の決定**
 - 連星中性子星の安定な最も内側の円軌道の半径は、中性子星の半径に依存する。従って、波形解析から中性子星の半径が決まる。
- **核物質密度を超える超高密度状態の解明**
 - 中性子星の半径と質量の関係がわかると核物質密度を超える超高密度物質の状態方程式が決定
- **ハッブルパラメーターの決定**
 - 2重中性子星までの距離が決まる可能性がある。従って、ハッブルパラメーターや減速パラメーターといった宇宙論のパラメーターが決まる。
- **ブラックホールの質量と角運動量の決定**
 - PSR1913 + 16のような1.4Msunと1.4Msunの2つの中性子星の合体では、全質量は2.8Msunなので中性子星の最大質量を超える。従って、角運動量を持ったブラックホールが形成されると予想される。すると合体最後の3ミリ秒でブラックホールの準固有振動が励起されるはずで、この実部と虚部の値からブラックホールの質量と角運動量が決まる。この質量が合体最後の3分間で決められた中性子星の質量から放出された重力波のエネルギーを引いたものになっていれば強い重力場での一般相対性理論の検証ならびにブラックホール時空の確認が出来る。
- **重力理論の決定**
 - 合体最後の3分間で一般相対論が正しいかがわかる。例えば、もしブランスディック理論が正しくて、ブランスディック理論のパラメーター $\omega \sim 2000$ なら、 ω が決まるかもしれない。これは重力理論が決まるかもしれないという重要な可能性の指摘である。

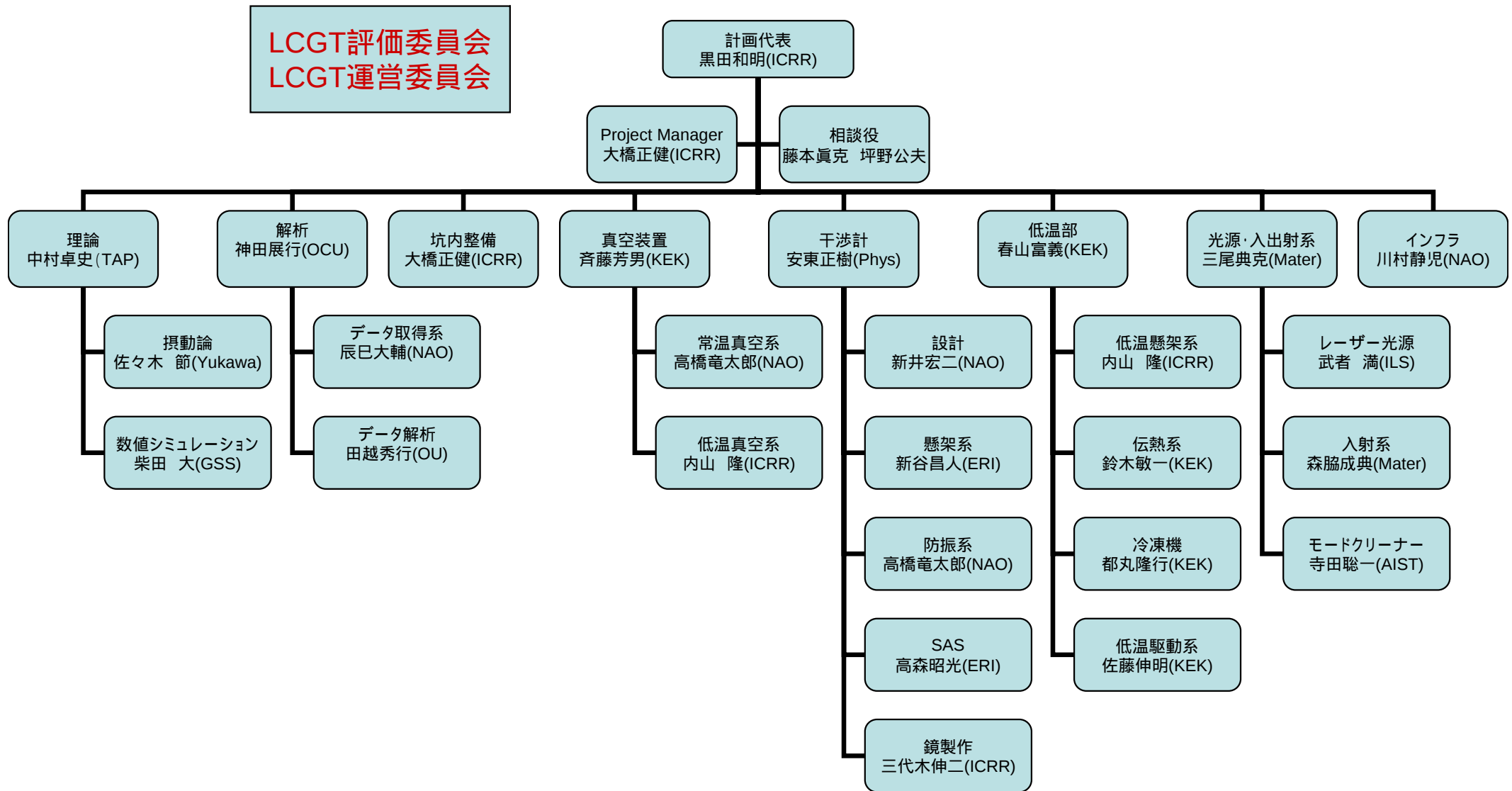
期待される成果(2)

- 超新星爆発のメカニズム
 - 超新星爆発を引き起こすメカニズムは明確ではなく、放出される重力波の時間発展から物質の運動について制限が課せられ、メカニズムを推定できる。
- ニュートリノの質量の決定
 - 超新星爆発の際に放出されるニュートリノと同時に重力波が検出されれば、それらの到達時間からニュートリノの光速度からのずれがわかり、質量が推定できる。同時に放出されるガンマ線などでも同じ比較が可能であるが、途中物質による分散効果のために正確ではない。
- ガンマ線バースト現象の解明
 - ガンマ線バーストの候補として超新星爆発が挙げられているが、これが同定される可能性がある。これはもしそうなら重力波の検出と同時にガンマ線も検出され方向も一致しているはずである。これは現代天体物理学の謎である、ガンマ線バースト現象が解明されたことになる。
- その他
 - 重力波そのものの性質について伝播速度や偏波から一般相対性理論の検証ができることはいうまでもないが、この他全く予想もしなかった現象が起きるかもしれない。例えば、事象の地平線に囲まれない裸の特異点が発見されるかもしれないし、宇宙紐が予想もしないほどの振動をしているかもしれない。

要求経緯

- 昭和63年 6月
 - － 研究代表者早川幸男のもとで科研費総合研究B「重力波の基礎研究」に国内の重力波研究者が結集して理論、実験の両面から研究を開始
- 平成 3年 4月
 - － 科研費重点領域「重力波天文学」(代表、京大基研中村卓史)開始
- 平成 5年 9月
 - － 宇宙線研究所共同利用運営委員会将来計画検討小委員会中間報告において宇宙線望遠鏡、重力波望遠鏡採択
- 平成 6年 8月
 - － 重力波の研究推進について国立天文台、宇宙線研究所、高エネルギー物理学研究所の3所長による合意書交換
- 平成 7年 3月
 - － 宇宙研100mディレイライン方式干渉計完成。国立天文台20 mファブリーペロー干渉計完成。ファブリーペロー方式による直接干渉に世界で初めて成功
- 平成 7年 4月
 - － 新プロ「高感度レーザー干渉計を用いた重力波天文学の研究」開始。国立天文台に300 m基線長干渉計建設着手
- 平成 9年12月
 - － 300 m基線長のファブリーペロー干渉計の一本腕が位相ロックに成功。3 mプロトタイプ干渉計でパワーリサイクリングに成功し、ゲイン2を達成
- 平成10年 1月
 - － 宇宙線研究所共同利用運営委員会で最高エネルギー観測計画に続いて重力波望遠鏡計画を推進するという方針
- 平成10年 2月
 - － 日本学術会議原子核専門委員会に上記方針を説明。
- 平成12年12月
 - － 学術審議会特定研究領域推進分科会宇宙科学部会において「当面の技術開発を強化しつつ早期の着手を目指す計画」と位置づける。
- 平成14年 4月
 - － 科研費特定領域「重力波の新展開」開始
- 平成15年10月
 - － 科研費特定領域「重力波の新展開」の中間評価を受け、後半の予算計画は当初通り

LCGT推進組織



LCGT概要

- 地下トンネル内真空装置1台に基線長3kmの2台のレーザー干渉計設置
- パワーリサイクリングを施したファブリーペローマイケルソン干渉計
- 信号もリサイクリング: 腕共振器内の光パワーを上げても周波数帯域が狭まらない方式(RSE方式)を採用
- 光パワーと周波数帯域は、2重中性子星合体の信号に最適化して決定し、腕共振器内光パワーが780kWで周波数帯域が200Hz
- 到達距離は偏波、感度パターンを平均して174Mpc
- 主鏡は懸架系を含めて20Kに冷却され、冷却にはCLIOで開発したパルス管冷凍機を用いる
- 鏡基材はサファイヤ単結晶。サファイヤファイバーで懸架され、その懸架点に副干渉計鏡があり、この副干渉計鏡は4K輻射シールドから伝導体で冷却されるステージに接続される
- このステージが室温真空内に設置されTAMAで開発中の低周波防振装置SASで防振
- 腕共振器内の光回折損失を下げるために鏡の直径は25cmであり、光反跳による雑音の影響を受けないようにするため、重さ30kg
- 主鏡冷却の伝熱線から混入する機械振動雑音を通常形式の防振装置で避けようとする、低温環境内に多段の防振装置を収納する必要があり、冷却空間の制約、低温動作の広帯域防振装置欠如のため、懸架点干渉計を導入する設計。副干渉計として主干渉計の光ビームと平行に真空ダクト内に設置される。
- 数百Hzより高い周波数領域の感度は、腕共振器の光パワーで決まるショット雑音で制限され、それより低い周波数から30Hzまでの領域の感度は、光パワーと主鏡の質量で決まる光反跳雑音で制限される。
- LCGTで達成目標の感度は、これらの感度より3dB悪い位置に設定される
- レーザー光源は波長1.064ミクロンの150W出力光源
- 真空系は公道を運搬できる長さ12mのパイプを坑道内で自動溶接して製作
- 同一真空内に設置される2台の干渉計はそれぞれ独立にインストール、維持運転可能な設計

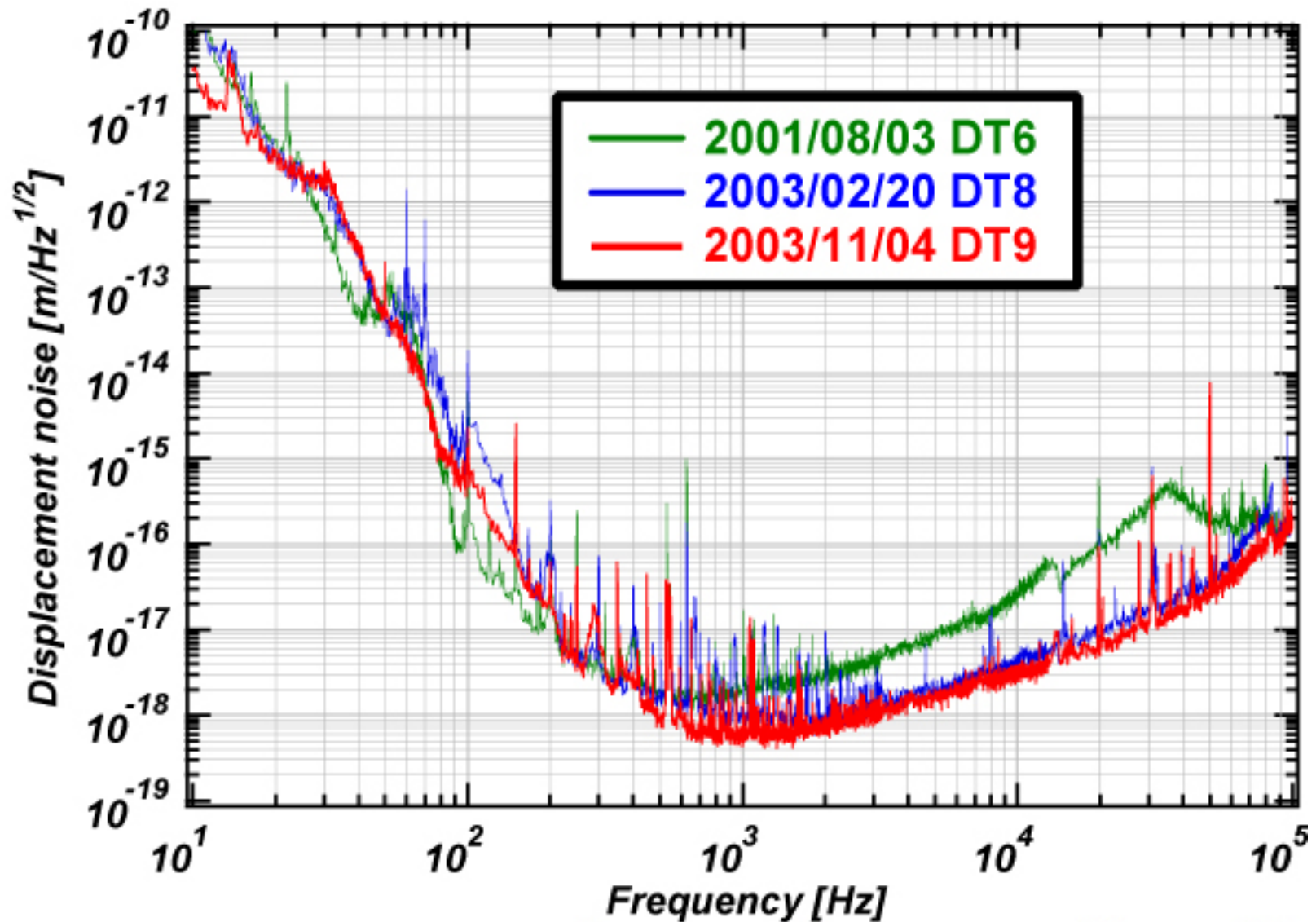
TAMAの現状

リサイクリング鏡装着以後の観測

(いずれもLIGO/GEOとの共同観測)

Run (hr)	Period	Year	Data
• DT7	30-Aug --- 4-Spet	2002	100
• DT8	14-Feb --- 15-Apr	2003	1158
• DT9	28-Nov --- 10-Jan	2004	558

Sensitivity is improved in every run.

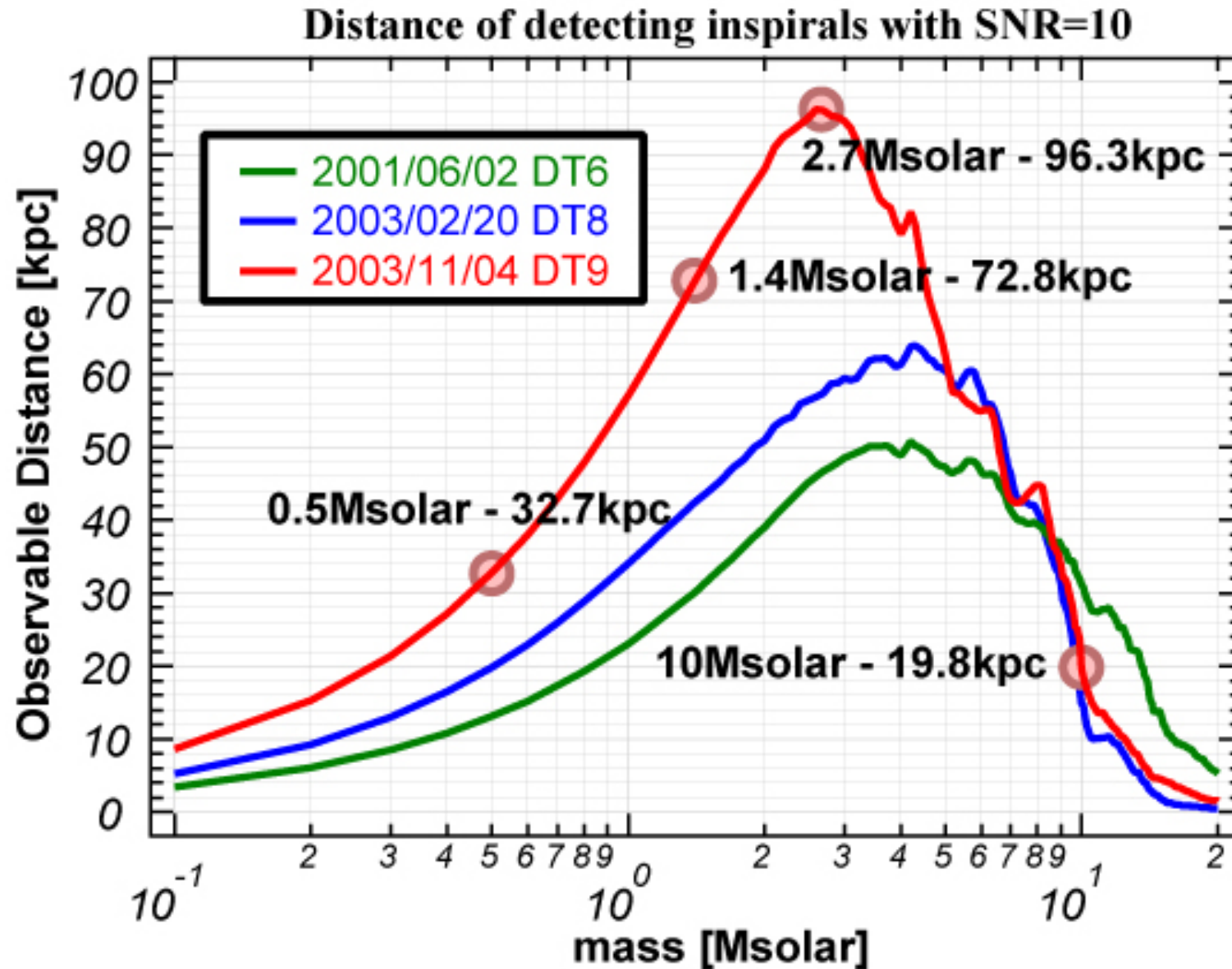


DT6: $15 \times 10^{-19} \text{ m/Hz}^{1/2} = 5 \times 10^{-21} / \text{Hz}^{1/2}$

DT8: $8 \times 10^{-19} \text{ m/Hz}^{1/2} = 3 \times 10^{-21} / \text{Hz}^{1/2}$

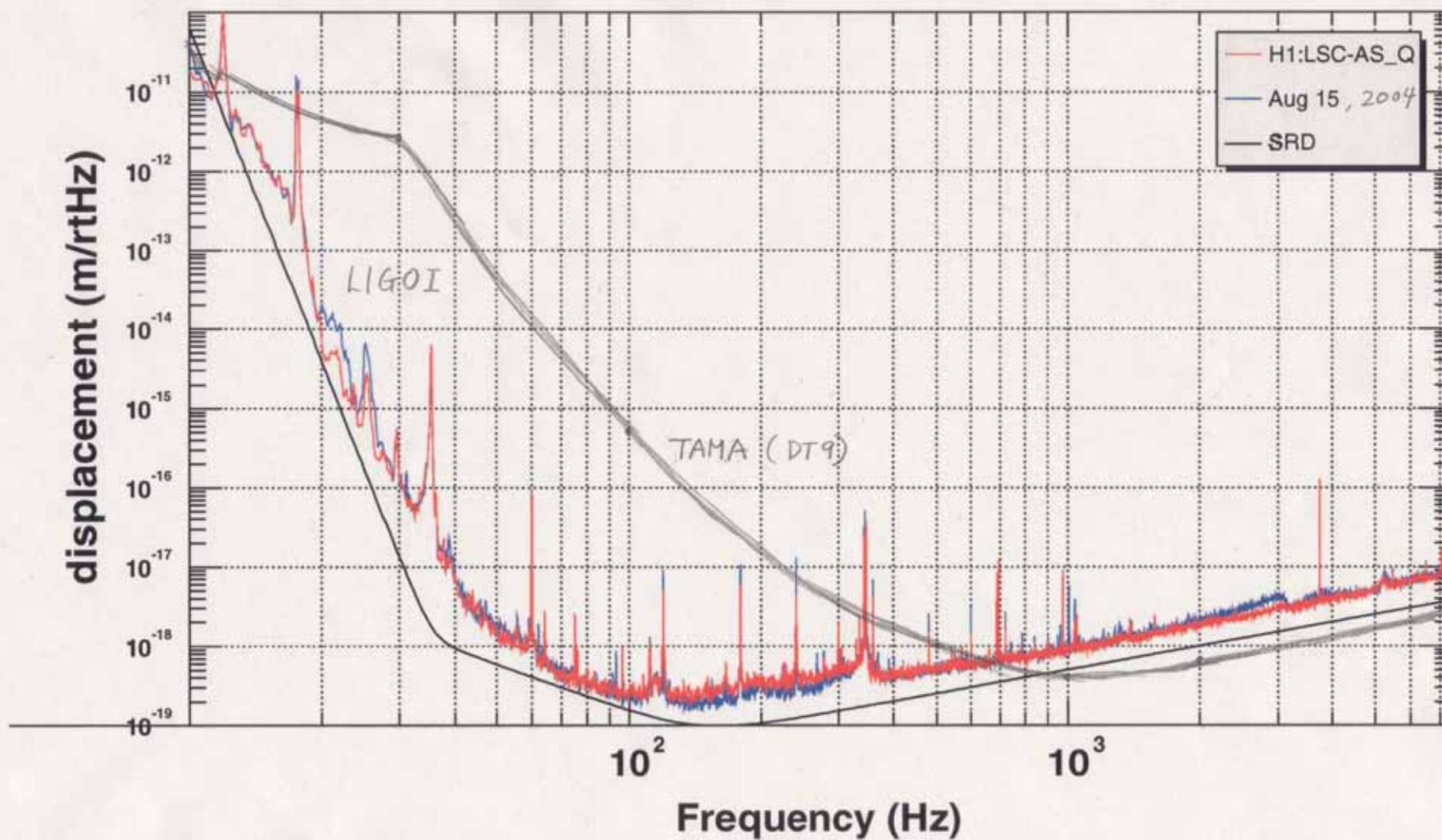
DT9: $6 \times 10^{-19} \text{ m/Hz}^{1/2} = 2 \times 10^{-21} / \text{Hz}^{1/2}$

Observable distance at DT 9 with S/N=10 versus total mass



Power spectrum

LIGOの感度改善状況 (変位雑音であることに注意)



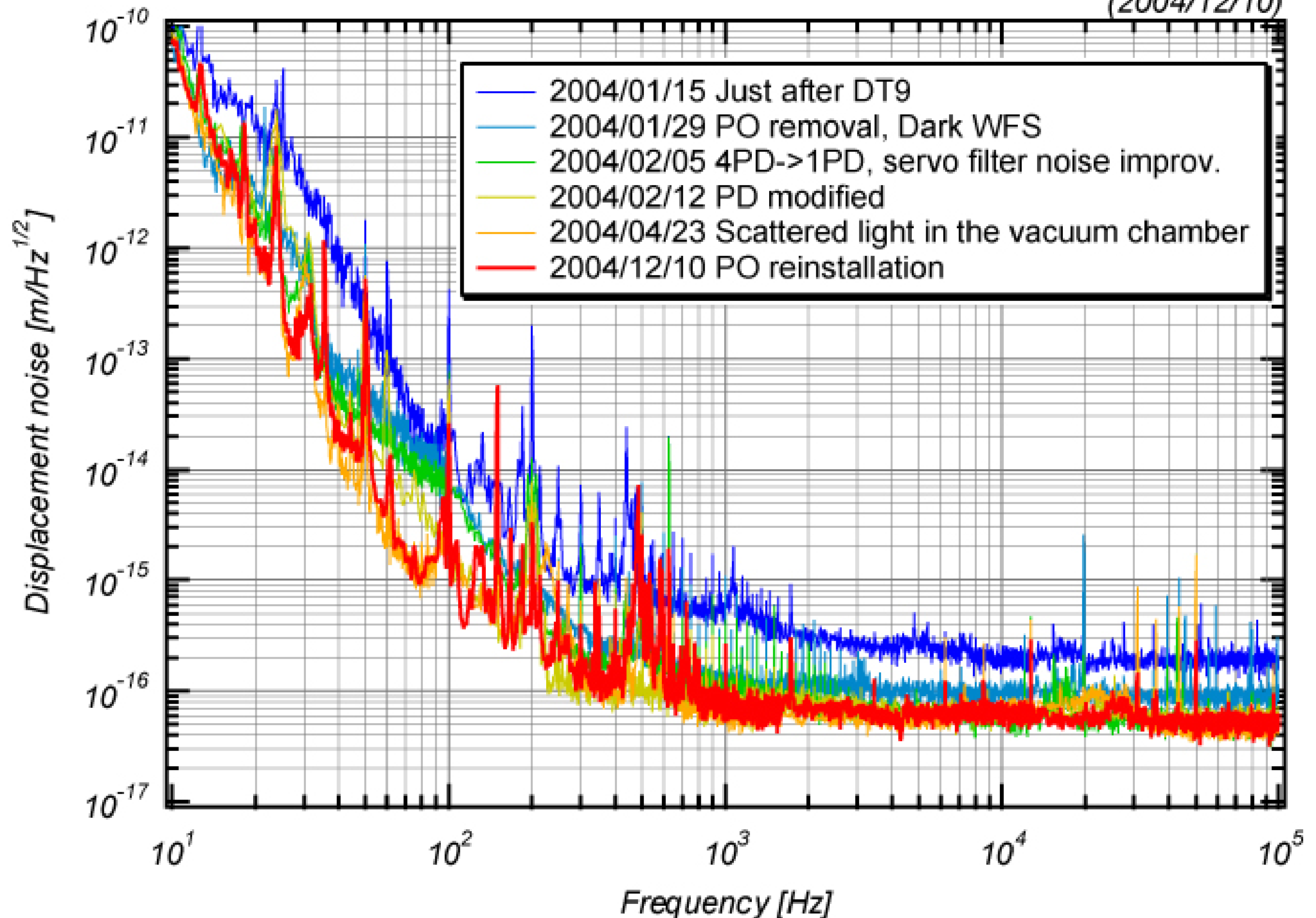
*T0=21/08/2004 07:35:06

*Avg=20/Bin=5L

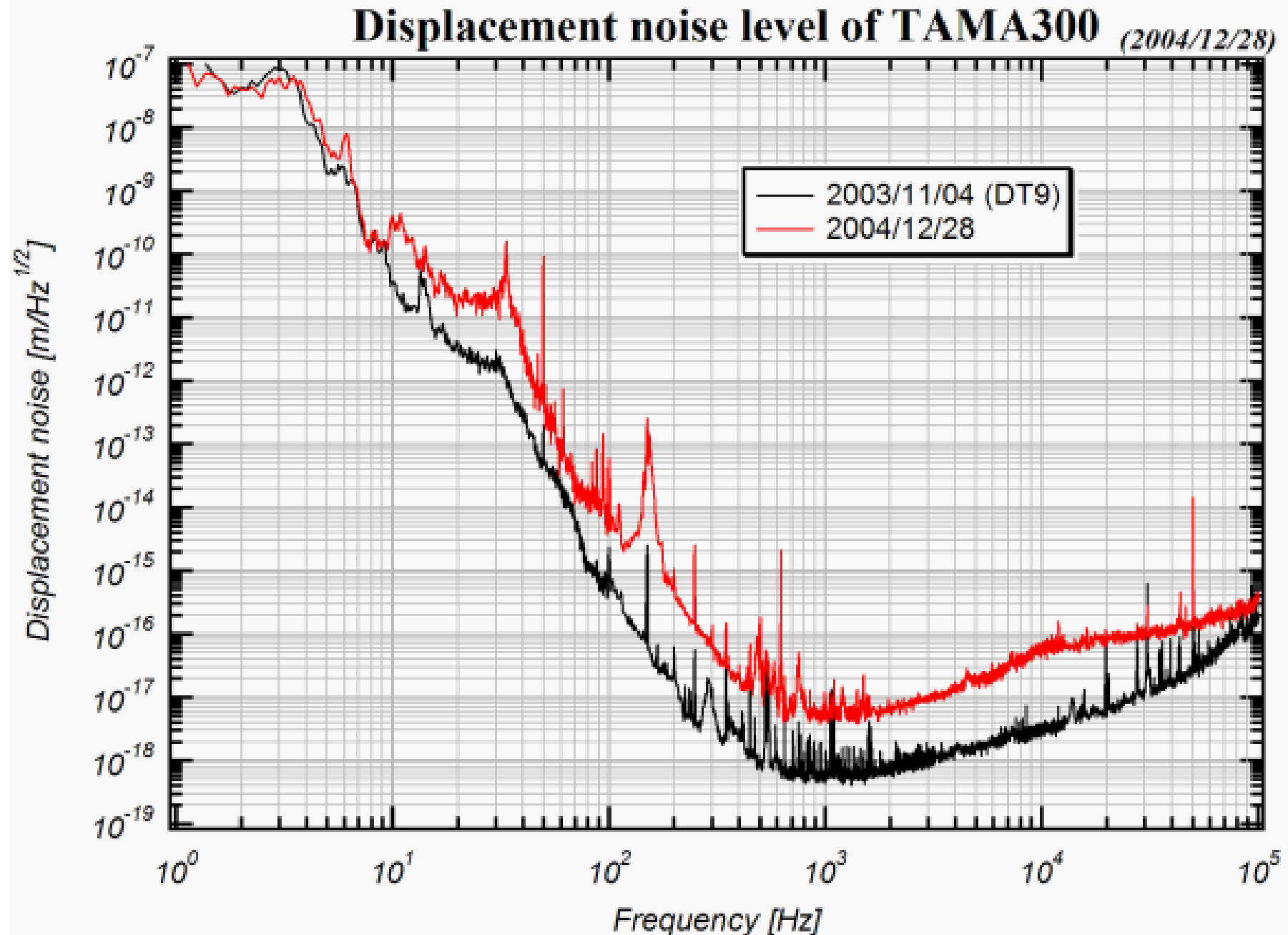
*BW=0.187493

Recycled Michelson ~ displacement noise level

(2004/12/10)



ノイズハンティングの後のFPMI復帰後、無調整でとった感度(2004年12月中旬)



神岡低温計CLIOの進捗状況

神岡地下施設での
CLIO100の建設・観測
低温干渉計の実証
H14 - H17



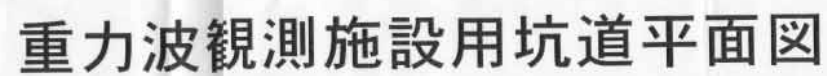
製作した低温クライオスタット
平成16年10月に1基を設置

LCGT経費概算作業

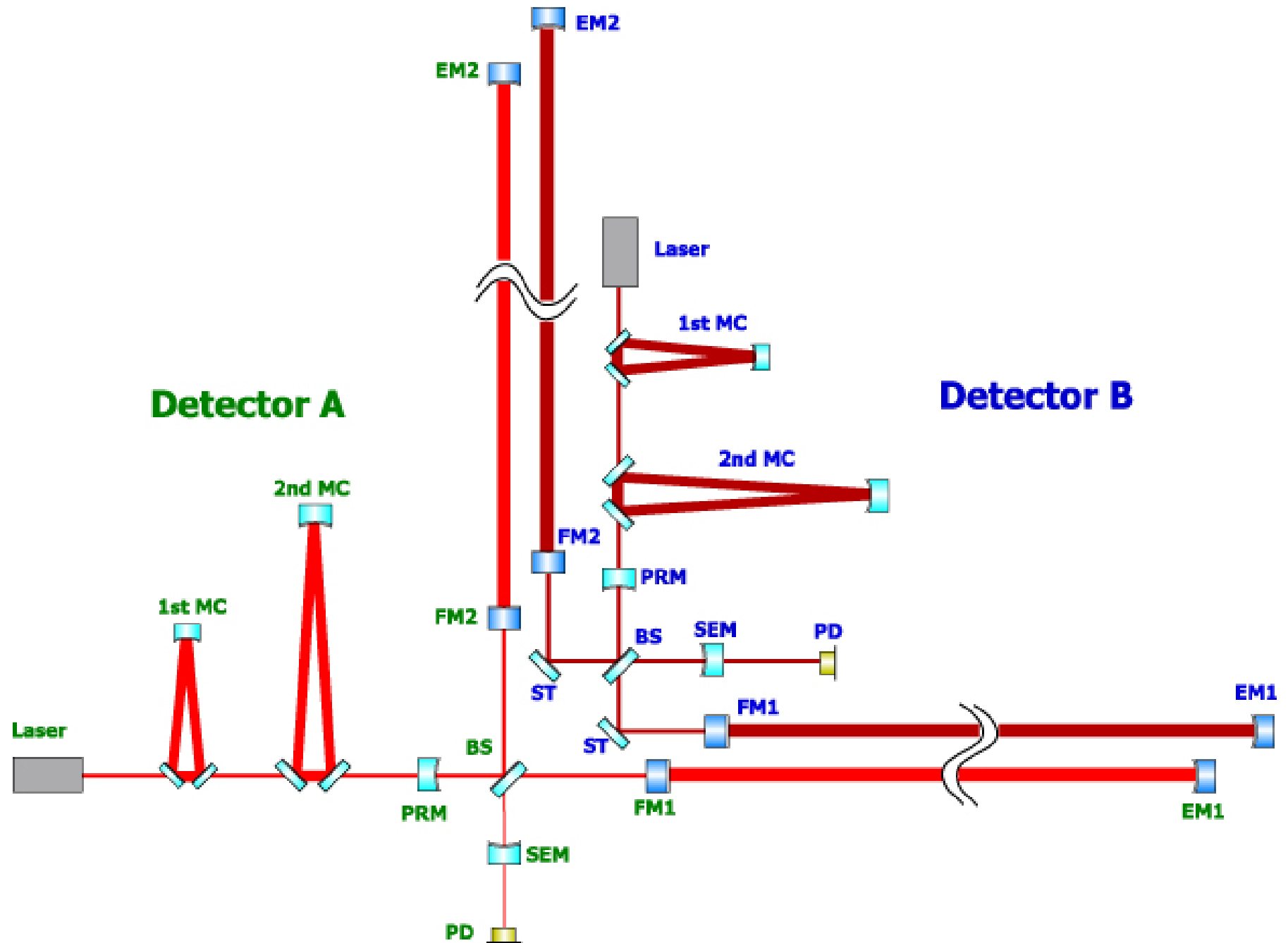
- トンネル掘削
- 真空装置
- レーザー干渉計
- 低温懸架・冷凍機
- 常温防振
- データ取得
- 解析
- インフラ
- その他

トンネル掘削・整備

- 第一次案による見積額 3,640百万円
 - 茂住坑道活用(3km新規、3km拡幅)
- 第2次案による見積額 3,396百万円
 - CLIOと同じ幅4.5m × 高さ4m <- 標準形状
 - 土新坑口採用(6km新規)
- 現在案による見積額
 - 3kmトンネル2本を掘削する。2本は独立に掘り、期間を短縮する。
 - 掘削用重機を工夫して、経費圧縮をめざす。
 - 幅4m × 高さ3.5mの場合、3,415百万円
 - 幅3.9 × 高さ3.2mの場合、3,318百万円
 - 掘削をどこからやるかによりアクセス道路の付け方が変わる
 - 真空タンクが置かれる中央、エンド室は入り口(山の斜面)からなるべく奥にする(現在は100mぐらいを想定)



2 台の干渉計の配置案



真空装置

1.チューブ製造費	1,470	単位:百万円
2.チャンバー製造費	630	
3.真空機器費	1,022	
4.工事費	1,660	
5.アライメント	100	
6.現地ベーキング	300	

計	5,182	

概算根拠(番号は上記各項目に対応)

1. 新日鐵の見積の半分(1セットなので)。神戸製鋼の見積が出れば精度が上がる。
2. 新日鐵の見積(2セットのまま)。
3. 実際の見積の積算。チューブとチャンバーの接続にDN900のゲートバルブを使った場合は68アップ。
4. 主にチューブの設置にかかるとして新日鐵の見積の半分(1セットなので)。
5. KEK-PS(周長300m)での費用より推定。
6. 新日鐵の見積の半分強(1セットなので)。チタンの場合不要。

光学系及び制御系

- 干渉計2台分合算
- テスト干渉計の製作費用, 干渉計の動作試験や雑音低減のための試験用光学部品や電気回路類も含む
- 合計 882,120千円
 - 内訳 入射光学系 253,440千円
 - 出射光学系 187,200千円
 - 制御系 269,500千円
 - 測定機器 94,080千円
 - テスト干渉計 77,900千円

レーザー光源

- 本体レーザー光源 5台 739,250 千円
- SPI用レーザー光源 2台 54,420
- 高出力光用光検出器 4,290

総計 797,960 千円

懸架・低温系

1. 懸架・冷却・防振部	207,162 千円
--------------	------------

ファイバー材料・接合費等

2. 冷凍機部	552,993
---------	---------

冷凍機36台等

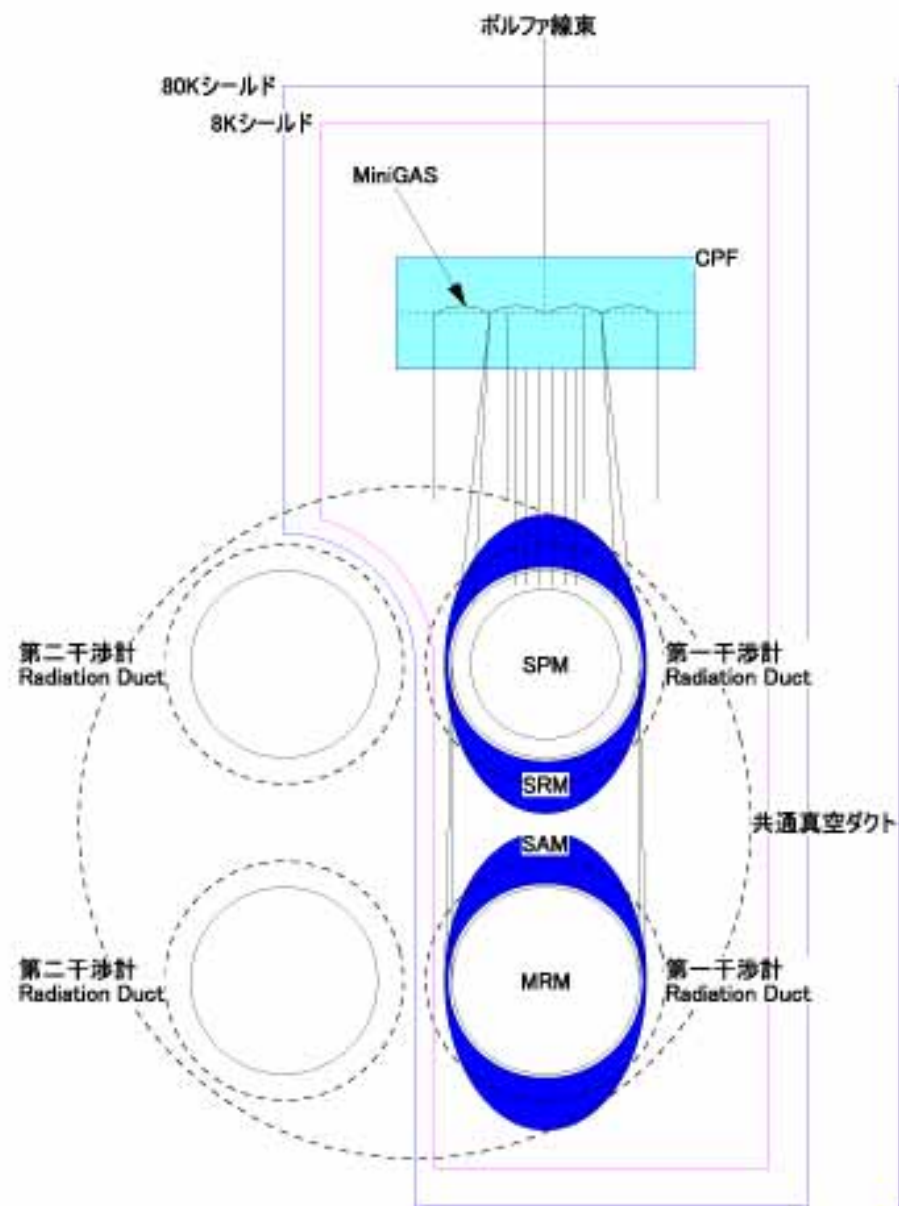
3. クライオスタット部	1,866,900
--------------	-----------

8基、シールド付真空パイプ等

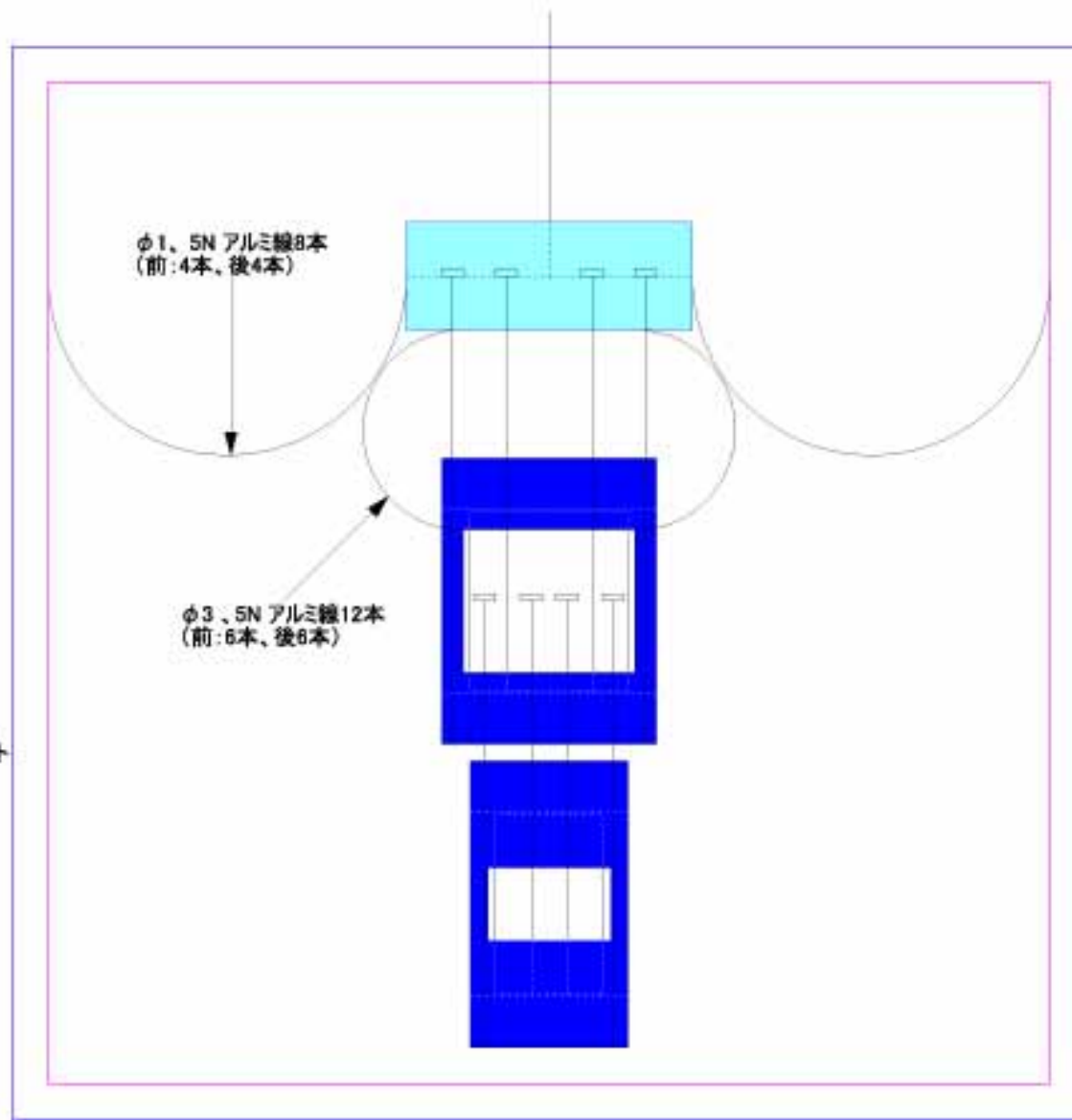
計 2,627,055 千円

懸架・冷却・防振系では、2組のSPI付き干渉計を扱う

正面図



側面図

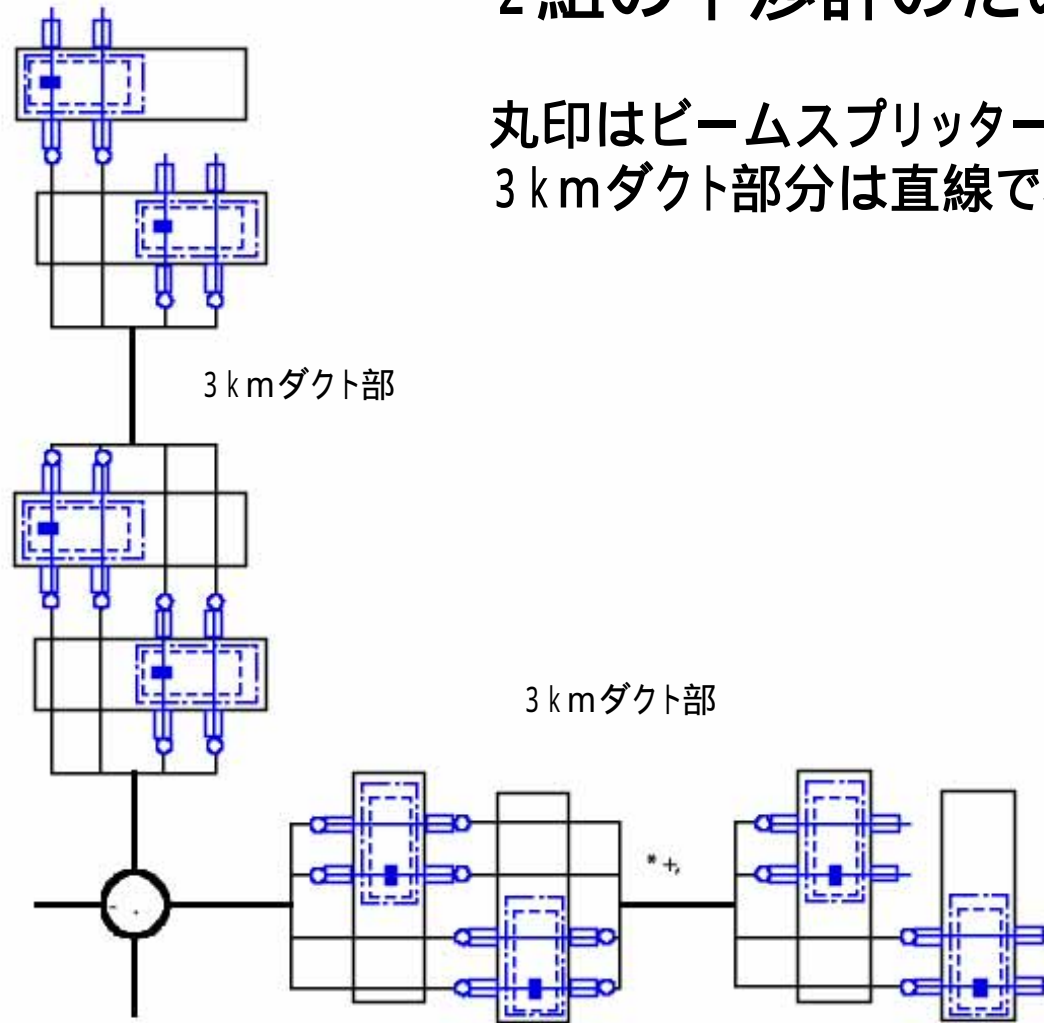


鏡の製作

- サファイヤ基材
 - 主鏡 8枚
- 人工石英基材
 - B S 2枚
 - パワーリサイクリング鏡 2枚
 - RSE鏡 2枚
 - モードクリーナー鏡 2セット
 - MMT鏡 2セット
- 基材と研磨で概算 200
- 成膜装置の改造費 100
- 計 300 百万円

2組の干渉計のためのクライオスタットの配置

丸印はビームスプリッター、
3 kmダクト部分は直線で表現



マンパワー(最終年度、検討中)()は現有人員

- 光学系開発
 - スタッフ6(1.5)、P D 16
- レーザー光源開発
 - スタッフ0.5(0.3)、P D 4
- 懸架・冷凍機系開発
 - スタッフ8(5)、P D 4
- データ取得系開発
 - スタッフ2(1)、P D 4
- データ解析系開発
 - スタッフ6(2)、P D 8

ここにはない真空、施設、
インフラ、鏡製作では
現有スタッフで賄う

運営費

- 光学系開発
 - 第3年次まで年間500千円、4年次11,000千円、5年次25,000千円
- レーザー光源開発
 - 4年次、5年次に500千円
- 懸架・冷凍機系開発
 - 合計で19,675千円
- データ解析開発
 - 検討中

経費のまとめ(見積もり作業中)

• インフラ	5.0	億円	観測施設検討中
• トンネル	33.9		
• 真空	52.5		
• 光学系	9.3		
• レーザー	8.0		
• 懸架・冷凍	26.3		
• 鏡	3.0		
• データ取得	4(?)		見積もり中
• 常温防振	2.3		
• その他	4.0		トンネル内設備等
合計	144.3+4.0(?)		

建設計画5年に調整2年が必要な理由

- TAMAの場合、20mの場合、KLICの場合との比較
- 最終感度に近い状態でないと最適パラメータ調整が不可能

国際競争力と協調

- 強固な岩盤で囲まれた低振動環境下での干涉計の比類なき安定性
- 物理的に無理のない(直接冷却の)低雑音化による長期的安定性の確保
- 波形の知れた信号の信頼度高い検出
- 20m、TAMA、CLIOによる熟練
- 重力波源決定に必要な国際協調

結論

- LCGT計画の要求を提出
- 物理的意義は高まる一方である
- 経費の概算を進められるほど計画が成熟
- 技術面では挑戦的技術を含んでいる
- 推進組織の整備が終了した
- 問題となっていたTAMAの感度も順調に改善