



LCGTを特徴づける次世代重力波干渉計の技術

- 1. 低温鏡による熱雑音の低減 -> CLIOで検証
- 2. 地下という低地面振動環境 -> CLIOで検証
- 3. RSEという複雑な光学設定
 - デジタル制御 -> CLIOで開発検証
- 4. ハイパワーレーザー -> 東大新領域で開発検証
- 5. 低周波防振 -> TAMAで開発検証

CLIO: LCGTのためのプロトタイプ干渉計として重要な役割を担ってきた













Start of CLIO construction



The 1st cryostat install



The inline end cryostat has been installed. 2004/09.

One arm has been completed.



Perpendicular arm has been completed. 2005/02.

Vacuum system completed





2005/06









地面振動が大変小さい神岡の地下は重 力波観測に最適である。それでも究極に は、ミクロのレベルでの鏡の中の分子の 熱運動が問題になる。つまり熱運動によっ てわずかに鏡の表面がゆらぎ、それが空 間の揺らぎと区別できなくなる。 分子運動で鏡



鏡をマイナス253度以下(絶対温度で20度) 以下)に冷やして熱運動を押さえる。 非常に困難な技術開発を必要としたが、 10年にわたる開発研究で可能となった。



2011/9/18 日本物理学会@弘前大学, 宮川 治

の表面がわず

かに揺らぐ。







- レーザーが鏡に入射しているため常に暖 められている
- ・鏡を吊っているワイヤーの熱伝導を通して
 鏡の熱を吸い上げてる
- 鏡は高真空中(10⁻₅Pa)にあるため対流や 放射では冷やすことができない
- ・冷却にともない、冷凍機の振動や鏡の汚れが影響





Heat link: Cryostat - Cryo-base





重力波測定は 微小ノイズとの戦い

1.低い周波数は地面が揺れ ることで、鏡が揺らされる

2.真ん中の周波数は振り子 や鏡が300kの熱を持ってい ることによる熱振動が見え ている

3.高い周波数は、光の粒子 性に依る物で、光検出器に 入る光子数は常に一定とい うわけでなく、統計的な揺ら ぎがあり、その揺らぎがノイ ズになる











- •常温: thick amorphous fibers
- 低温 99.999%, d=0.5mm pure aluminum fibers
- 1. 242K 5/19/2009
- 2. 212K 5/20/2009
- 3. 79K 5/26/2009

・鏡の冷却にともないアルミワ
 イヤーも冷やされ、振り子の熱
 雑音も下がったと考えられる。

212Kから79Kの大きなとびは、冷却にともない構造体の恐らく縮みによるきしみが発生してノイズを測ることができなかった、もしくはロックが持たなかった。このきしみは100kを下回る温度では発生しなくなった。







- 冷却に感度改善は鏡の熱雑
 音の軽減によるものか?
- 3つのノイズフロアが重なって いると考えられる
- Low freq noise: f^{-2.5}
 - Suspension thermal noise
- High freq noise: cavity pole 250Hz.
 - Shot noise
 - (RF intensity)
- Mirror thermal noise.
 - all mirrors at 300K
 - only near mirrors at 20K.





鏡を冷却することにより 300Kの熱雑音の熱雑音の 制限を突破したと考えられ る。

この感度の向上は誤差の 範囲内で低温での鏡の熱 雑音を含むノイズモデル矛 盾しない。 History of cryogenic mirrors Japan original!!

1997 Stating of feasibility study at KEK. Sapphire mirror & fiber suspension.

2001 CLIK: Control of cryogenic Fabry-Perot cavity at Kashiwa.

2002~ CLIO: Sensitivity of cryogenic GW detector.

2011: We are here now!!

201? LCGT: Detection of Gravitational wave.



10cm

7m

100m

3000m

JGW-G1100595

2011/9/18 日本物理学会@弘前大学, 宮川 治



Michelson interferometer (MI) Fabry-Perot MI (FPMI)





干渉計の光学設計が複雑化していく過程で制御に 関して大きなパラダイムシフトが起こった

計算機による干渉計のリアルタイム制御

- 制御フィルターの置き換え
- ・非常に多くの制御自由度の取り扱い
- ヒューマンエラーをなくす
- ・ 職人さんを作らない
- ・一台目で開発された技術の二台目、三台目への
 の
 簡単なコピー
- ・出来るだけ安定な重力波観測を行う



 最近の重力波検出器では、制御、 測定、チューニングなど、ほとん どのことがコントロールルームの 計算機上でできる

LIGOの制御系

- » これはヒューマンノイズを避ける 面からも重要である
- 優れたソフトウェアの開発が、感度向上など全体の進展に大きく 関わる時代になっている









CLIOでデジタル制御をする意義

- ・ LCGT制御系のプロトタイプとしてのテストベンチ
- CLIOは日本では低周波において最高感度を持っている
 - デジタル制御に固有のノイズの検証
- LCGTに近い環境
 - 坑内、同レベルの地面振動、電源環境等
 - LCGTに近い制御帯域
- CLIO側へのデジタルシステムに柔軟なインター
 フェースの提供





-

1

0

E PRESS

OUT2

PCle接続

0000

ONE STOP

Real time PC CentOS 5.2+real time kernel 4core x 2 Xeon Anti Imaging filters Anti Alias filters

DAC adapter

ADC adapter

Binary output adapter

ADC/DAC In Expansion Chassis ADC:32ch/枚、\$4K DAC:16ch/枚、\$3.5K Binary Output:32ch/枚、\$250



Digital制御でのCLIO感度向上の様子



AD/DAC noise





- 1. リアルタイム制御としての役割
 - 複雑な多自由度制御への対応
- 2. 重力波データ取得システムとしての役割
 - 制御信号=重力波データ
- 3. 干渉計調整システムとしての役割
 - 感度向上までの時間短縮
- 4. 干渉計自動運転としての役割
 - 安定した観測体制
- 5. 各種情報収集システムとしての役割
 - 多チャンネル信号の自動割り振り





2011/9/18 日本物理学会@弘前大学, 宮川 治



- 1. 制御信号ネットワーク: データ量はそれほど多くはないが、制御を壊さない最小の遅延でまわす必要がある --> リフレクティブメモリ: GE (long distance ~km, but slow), Dolphin (fast, but short distance ~100m)
- 2. 重力波信号ネットワーク: 重力波到達時間を決定できる精度程度の遅延まで許されるが、膨大なデータ量 --> Myrinet or Open Myrinet (遅延の少ないプロトコル)
- 3. ヒューマンインターフェースのためのTCP/IPネットワーク
- 4. ADC/DAC及び計算機間の同期ネットワーク --> Master/Slave style timing system

詳しい話は明日午後13:30~ SV会場にて









TAMA





- 重力波グループの長年の夢であるLCGTが
 いよいよ現実のものとなる
- TAMA、CLIOをはじめ、多くの研究者による これまでの地道な努力によって、LCGTのた めの技術が蓄積されてきた
- Einsteinが予測した重力波の検出を目指す
 べく、LCGTの実現を全力で目指す