

LCGT の技術的側面とノイズ対策

理学系研究科物理学専攻修士課程 1 年
牛場崇文

1 LCGT 計画

LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope) 計画とは神岡鉱山の地下に基線長 3 km の Michelson 干渉計型重力波検出器を作る計画である。LCGT 計画では設計の目標感度を達成することで年に数回程度の中性子連星合体や超新星爆発由来の重力波を観測し、重力波天文学の礎を築くことが目的である。

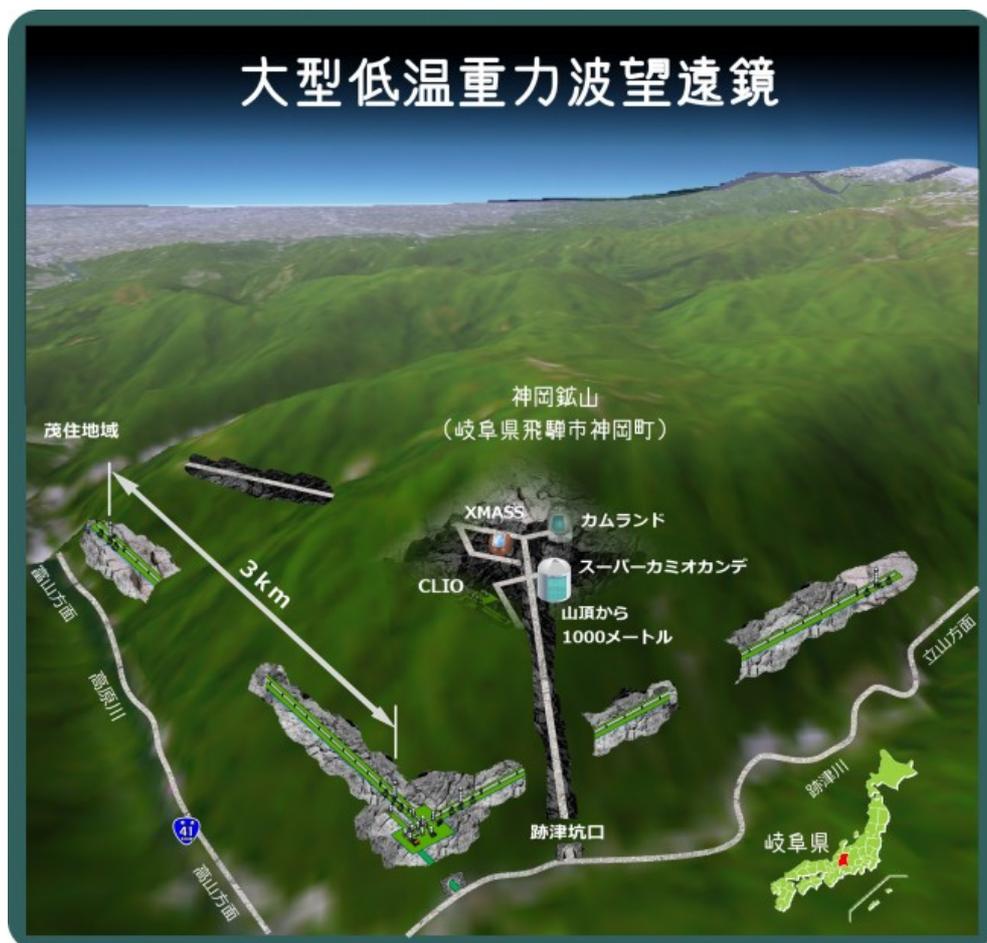


図 1 LCGT 完成予想図

2 重力波観測の意義

重力波を観測することは以下のような意義があると考えられる。

1. 宇宙の晴れ上がり以前の宇宙の直接観測が可能になる
2. 中性子星内部の構造を直接観測することができる
3. 位置天文学の新たなツールとして活用できる

しかしながら、重力相互作用は引力しか働かないため重力波には双極子放射がなく、最低次が四重極放射なので検出できる信号が非常に弱い。したがって、種々の雑音に信号が埋もれてしまって信号の検出が非常に困難であり、雑音を除去（低減）することが重力波検出には必須である。

3 重力波観測で扱う種々の雑音

重力波では以下のような雑音が測定の感度を悪化させる。

1. 散射雑音
2. 輻射圧雑音
3. 残留ガスによる雑音
4. 真空度による雑音
5. 地面振動による雑音
6. 温度揺らぎによる雑音
7. 熱振動による雑音

以下ではそれぞれの雑音についてみていく。

3.1 レーザー由来の雑音

レーザー由来の雑音には散射雑音と輻射圧雑音がある。散射雑音とは光が量子であるために定常出力のレーザーであっても単位時間当たりの光子数が揺らいでしまうことに由来する雑音である。散射雑音の強度 (δ) はレーザーパワーを P とすると

$$\delta \propto P^{-\frac{1}{2}}$$

となり、レーザーパワーを大きくすることで散射雑音による影響を小さくできることが知られている。一方輻射圧雑音とは干渉計のミラーがレーザーの光子から運動量を受け取ることによって鏡が揺れることに由来する雑音である。鏡の振動によって干渉計を構成する鏡の相対位置が変化すると、光路長が変化しそれが干渉計の雑音となる。輻射圧雑音の強度は (δ) レーザーパワーを P , 干渉計のミラーの質量を M とすると

$$\delta \propto P^{\frac{1}{2}} M^{-1}$$

となることが知られており、レーザーパワーを減少させる、もしくは干渉計のミラーの質量を大きくすることによって輻射圧雑音による影響を小さくすることができることが知られている。したがって、散射雑音と輻射圧雑音の和には原理的な限界が存在し標準量子限界と呼ばれている。現在は観測したい帯域 (100 Hz-1000

Hz) で感度のピークとなるようにレーザーパワーは 180 W の予定である。したがって、高出力かつ高安定度のレーザーの開発が重要である。

3.2 真空システム由来の雑音

真空管内の気体の密度が揺らぐと気体の屈折率が変化する。屈折率 n の媒質中では光の波長は $1/n$ になるので気体の密度が揺らぐことにより光路長が変化し、干渉計の雑音となる。一方、真空度が十分高くない場合真空管内の残留気体分子にレーザー光が散乱される。この光は真空管内で何度も反射を繰り返し、その光はフォトディテクタ(光を検出する素子)に入り、これが干渉計の雑音となる。したがって、高い真空度 (10^{-7} Pa) を保つ真空システムが重要であり、現在基線部分 (3 km) の真空パイプを製作中である。

3.3 地面振動由来の雑音

地面振動により干渉計ミラーの相対位置が変化すると光路長が変化し干渉計の雑音となる。これに対する対策として LCGT では以下のようなことを行っている。

1. 地面振動の比較的小さな神岡に干渉計を設置する。
2. 干渉計の基線長を長くする。
3. 防振系 (SAS) を開発する。

1 に関しては地面振動が小さな土地を選べば選んだだけ効果を上げることができる。2 に関してはノイズ強度を δ とし干渉計の基線長を L とすると

$$\delta \propto L^{-1}$$

の関係があるので、基線長を長くすることによって地面振動によるノイズの効果を小さくすることができる。3 に関しては共振周波数の小さな振り子を用いて共振周波数より高い周波数帯域での地面振動を小さくする。図 2 に三鷹の国立天文台の地面振動と神岡鉱山の地下の地面振動の比較結果を示す。これを見ると、神岡の地面振動は広い周波数帯域で三鷹の地面振動よりも小さいことがわかる。

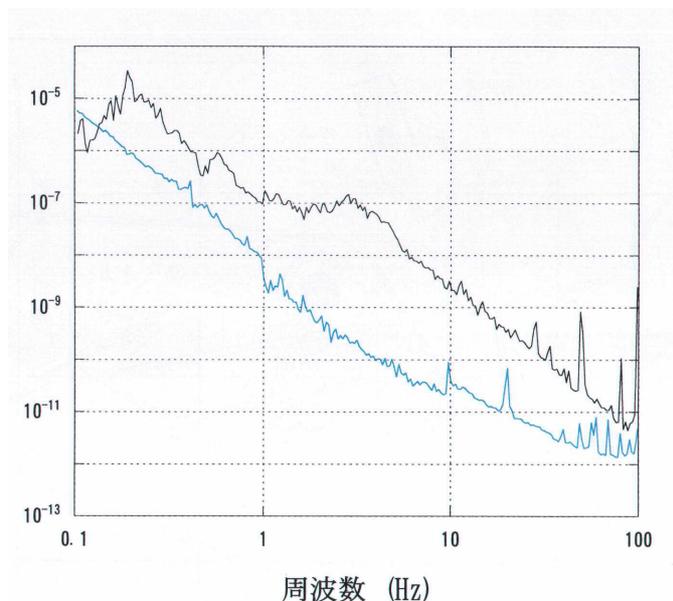


図 2 神岡と三鷹 (国立天文台) の地面振動の比較

3.4 低温システム由来の雑音

干渉計の各々のミラーは熱振動をしているのでミラーの相対位置が変動し干渉計の雑音となる。熱振動による影響はノイズの強度を δ ミラーの温度 T として

$$\delta \propto T^{\frac{1}{2}}$$

の関係がある。したがって、ミラーの温度を下げることでミラーの熱雑音による雑音の影響を小さくすることができる。また、干渉計のミラーは熱膨張率を持つので温度揺らぎに対して膨張・収縮を起こす。これによって干渉計ミラーの相対位置が変動し干渉計の雑音となる。したがって、ミラーの温度揺らぎを抑えるような冷凍システムの設計が必要である。現在地上で観測を行っている検出器はすべて常温で運転されており、干渉計を低温に冷やすことは LCGT の非常に大きな特徴の一つであるが、そのため干渉計を低温に冷やす技術は確立されておらず今後開発を行っていかねばならない。以下に低温システムを構成する際の要求を挙げる。

1. 地面振動を導入しない
2. 真空度を悪化させない
3. 温度の揺らぎを抑える

1 に関しては低温システムから導入される振動を抑えられる新たな冷凍機の開発に成功した。この冷凍機は現在神岡に設置されている基線長 100 m の重力波検出器 (CLIO) に搭載されており、振動レベルを神岡の地面振動と同じレベルまで低下させることができることが確認されている。2,3 についても様々な提案がなされているが詳細はまだ決定していない。図 3 に CLIO に搭載されている冷凍機の外観図を示す。



図 3 CLIO に搭載された冷凍機

4 低温に冷やす意義

LCGT の既存の地上重力波干渉計と異なる点として干渉計のミラーを極低温 ($\sim 20\text{K}$) に冷却することがあげられる。これは低温にすることによってミラーの熱雑音を低下させることができるだけでなく、サファイアミラーの Q 値が低温で大きくなるという相乗効果を得られることも理由の一つである。したがって、サファイアの懸架にはミラーの Q 値を低下させないような懸架方法が選ばれる必要がある。現在は図 4 のような懸架方法がミラーの Q 値を低下させにくい懸架方法だと考えられているが、そのためにはサファイアのロッド (直径 1.8 mm の棒) 同士の接着 (接合) が必須となる。サファイアの接合は現在シリケート接合を行う予定であるが、ミラーの質量が非常に大質量のため低温に冷却した際シリケート接合の強度が十分かどうかの検証が今後必須である。

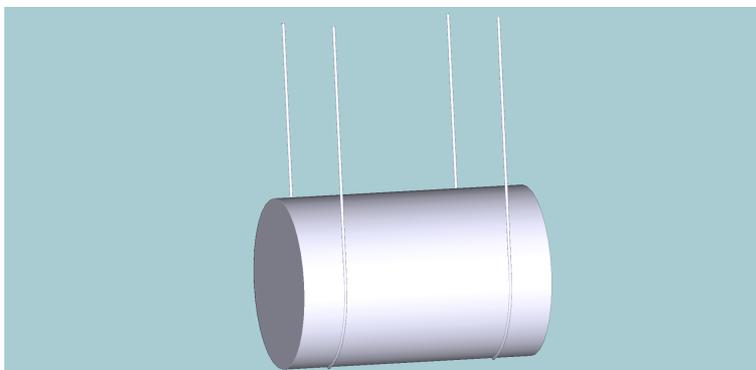


図 4 ミラーの懸架

5 今後の展望

LCGT では以上のような雑音対策をすることにより年に数回程度の重力波を観測できる達成できると考えられている。今後 2013 年には initial LCGT (iLCGT) が動き出す予定である。これは低温に冷やさず熱雑音以外の雑音が設計通りのレベルになっているかを確認し、目標レベルに雑音強度が近づくように改良することを目的とする。そして iLCGT での改良が終わると baseline LCGT (bLCGT) として低温に冷やし、重力波観測が本格的に始まる。