

# LCGT —低温重力波望遠鏡計画—

黒田 和明

〈東京大学宇宙線研究所 〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

e-mail: kuroda@icrr.u-tokyo.ac.jp

重力波検出を確実にするために TAMA300 に引き続く大型干渉計計画として策定された **Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope** (大型低温重力波望遠鏡) の概要とそのための技術開発について述べる。

## 1. はじめに

Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (大型低温重力波望遠鏡) は、TAMA300 の将来計画として国内の重力波グループが策定した大型計画である。これは、TAMA300 の感度を2桁余り向上させ、諸外国の検出器と合わせて文字通り重力波天文学を開始するための重力波検出器である<sup>1)</sup>。

## 2. LCGT の必要性

この特集の最初の記事(著者：神田展行)にも述べられているように、重力波は、まれな天体現象によって引き起こされる。そのような重力波を放出する現象の中で、2重中性子星については、その存在が実証され<sup>2)</sup>、かつ、強い重力場での物体の運動を扱う Einstein の一般相対性理論により、合体に至る過程が詳しく調べられており、放出される重力波の波形も予測されている<sup>3)</sup>。このため、2重中性子星合体の際の重力波は、おおむね 30 Hz から 2 kHz の範囲に感度をもつ地上の検出器の最も重要なターゲットである。

TAMA300 によるテスト観測はこの特集の記事(著者：川村静児)の中で紹介されているが、この TAMA300 の最終感度では、アンドロメダ銀河の距離程度までの2重中性子星合体による重力波が捉えられる。しかしながら、我々の銀河系やアンドロ

メダ銀河のような銀河系では、2重中性子星合体は100万年に1回程度の割合で起きると見積もられている<sup>4)</sup>。つまり、TAMA300 最終感度では2重中性子星合体を捉えるのに100万年の時間スケールの観測が必要になる。

このようなまれな現象をとらえるためには、我々の銀河系やその近傍にとどまらずできるだけ遠くの銀河で起こる重力波をとらえなくてはならない。我々の銀河のような銀河は平均的に1立方 Mpc あたり1個の割合で存在している。上の生起率を元にして、1年に数回というレベルで2重中性子星の合体を捉えるようにするためには、どこまで「見える」感度が必要であるかということ、90 Mpc くらいまで検出できる感度が必要である。合体生起率の見積り目の不定さを考慮すると、200 Mpc 程度まで「見える」感度があるとよい。これは TAMA300 の感度より2桁以上高い感度である。

レーザー干渉計で捉えられる最小の重力波は、干渉計の鏡の間の距離(腕の長さ)を  $L$  とし、雑音となる鏡のゆれの大きさを  $\Delta L$  とすると、 $\Delta L/L$  の程度の大きさである。従って、より小さい振幅の重力波を捉えるには、より小さい  $\Delta L/L$  を実現することが必要である。この  $\Delta L/L$  をどこまでも下げれば無限に感度が上がるかというそうではない。 $\Delta L$  はレーザー光の干渉で光の強度が電気信号に変えられて検出される。その際、レーザー光の周

波数のゆらぎや強度のゆらぎは雑音となる。先述の TAMA300 に関する記事（著者：川村静児）にも述べられている通り、周波数雑音の影響は基線長  $L$  を長くしても直接には下げられない。その代わりにこれらの周波数雑音、強度雑音は安定化のための参照制御システムを用いることにより技術的に小さくすることが可能である。TAMA300 ではレーザー干渉計の長い腕自身がそのような安定化のための参照系として組み込まれる複雑なフィードバック系が構成されている。以上の周波数雑音、強度雑音の影響が無視できるまで低減されたとして、光波の干渉をさらにより精密に検出しようとする、光がもつ光子としての性質からショット雑音と呼ばれる雑音が見えてくる<sup>5)</sup>。これは、原理的なものでレーザーのパワーを大きくして光子の数を増やし一つ一つの光子としての性質が目立たないようにしてその影響を下げるしかない。この光子のショット雑音が、究極的には基線長  $L$  に無関係に重力波検出感度を決めてしまう。限られたレーザーパワーに対しては、次節で述べるようにパワーリサイクリングにより実効的にパワーを増やすことでこのショット雑音を小さくできる。

TAMA300 では、先述の記事に述べられている通り、 $L = 300$  m であり、 $\Delta L$  を周波数スペクトルに分解してみると最も感度のよい周波数のところで 1 Hz の周波数幅あたり  $10^{-18}$  m である<sup>6)</sup>。この TAMA300 の感度を 2 桁上げようすると、一桁長い 3 km という基線長をもってしてもまだ一桁不足である。基線長を 2 桁長くすることは、立地場所や建設費の点で極めて困難がある。そのため、LCGT 計画では、3 km という基線長を採用し、鏡を極低温にし地面振動の小さい神岡鉱山の地下深くに設置して  $\Delta L$  を小さくしようとする。また、以上の  $\Delta L/L$  で決まる感度のレベルまで光子のショット雑音を下げするためには、TAMA300 で用いた 10 W クラスのレーザーパワーでは不足で、それより 1 桁大きい 100 W クラスのレーザー出力が必要となる。

以上述べて来たように、2 重中性子星合体の際の重力波を 1 年のうちに数回のレベルで捉えるためには、LCGT 計画の実現が必要である。図 1（グラビア参照）は、太陽質量の 1.4 倍の質量の中性子星連星が合体する際に放出される重力波をターゲットとした場合、世界で計画されている幾つかの検出器で捉えられる距離範囲を示して比較したものである<sup>7), 8), 9)</sup>。

### 3. 計画の概要

図 2 がこの計画の全体像を示している。レーザー干渉計の型式は、基本的に TAMA300 と同じである。すなわち、2 枚の高反射率鏡を 3 km の距離を置いて向かい合わせた Fabry-Perot 共振器を Michelson 干渉計の直交する 2 本の腕に設置し、ビームスプリッターからの光を導入する。2 つの共振器から出てきた光はビームスプリッターで再び重ね合わせられ、光検出器で電気信号に変換される。共振器とビームスプリッターとの位置関係は光検出器で光の干渉が弱められるように設定されるが、このとき、レーザー光源側には強め合う干渉光が戻っていく。光子雑音を減らすためには共振器の中にためられる光のパワーが大きければ大きいほど良いので、この戻り光も鏡をおいて跳ね返しもう一度入射させるパワーリサイクリングを適用する。光源は  $1 \mu\text{m}$  の波長で 100 W の出力でかつ高い安定度をもつ光源から作られるレーザーである。光源からの光には雑音が入っているので、モードクリーナーという光共振器で取り除かれる。次節で述べるように、鏡の変位雑音  $\Delta L$  を小さくするために 2 つの Fabry-Perot 共振器を構成する 4 枚の鏡は極低温 (20 K 程度) まで冷却され、これらを冷却するための冷凍機が設置される。低温にするために鏡の基板には広く使用される人工石英ではなく、サファイアの単結晶が使用される。電気信号は、計算機に取り込まれ、解析にかけられる。この干渉計は、空気による屈折率ゆらぎを除くために超高真空が必要である。干渉計全体は、神岡鉱山の地下トン



## Large scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (LCGT)

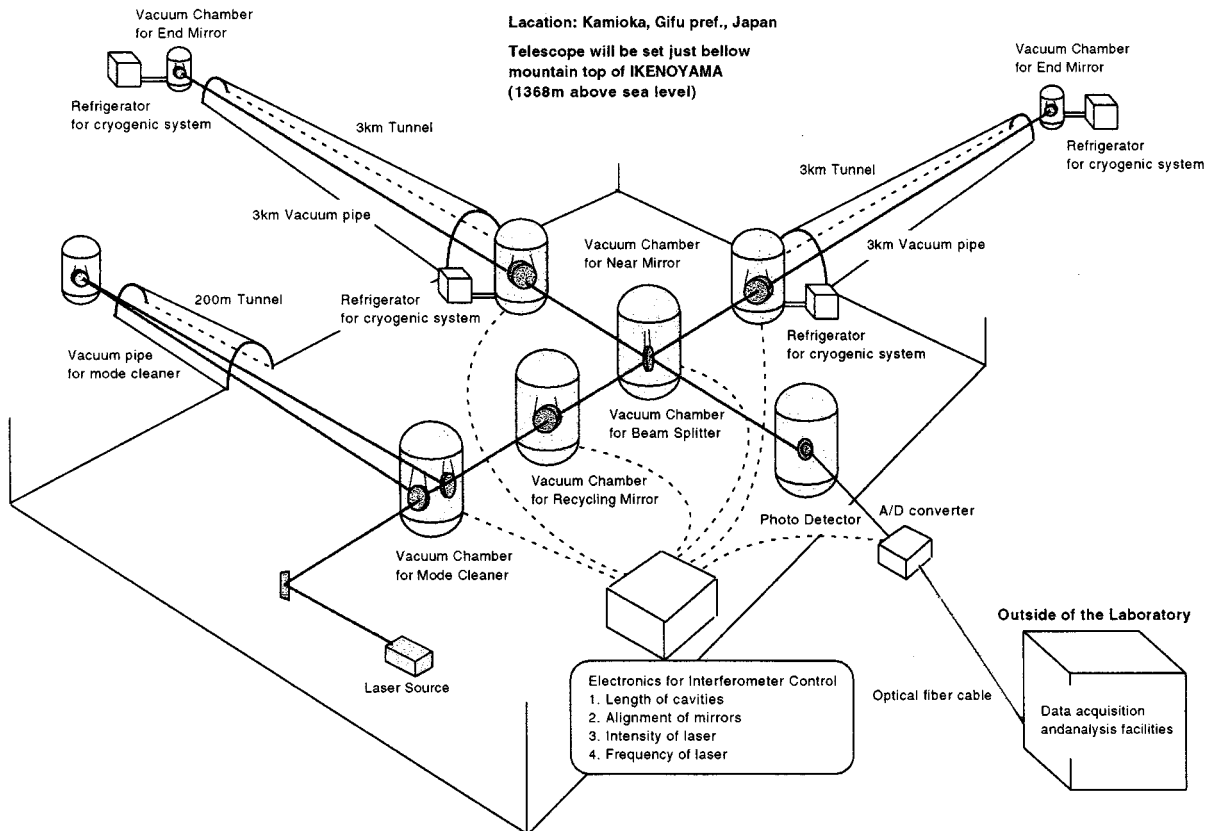


図2 LCGT計画の全体像 レーザー干渉計の型式は、基本的にTAMA300と同じであるが、3 kmの基線長を有し、極低温に冷やした鏡を用い、地面振動の少ない神岡鉱山の地下に設置される。

ネルに設置される。この地下環境が重力波検出に好都合であることはこの特集で神岡20m干渉計に関する記事（著者：大橋正健）にまとめられている。

### 4. 計画実現のための基礎研究

LCGT計画では、第2節で述べたように $\Delta L$ を小さくするために低温鏡を用いる。世界で建設が進むkmスケールの計画はすべて室温の鏡であり、低温鏡の採用はLCGTが初めてである<sup>10)</sup>。

鏡の変位雑音 $\Delta L$ をもたらず最大のものは地面振動から来るが、30 Hzを越える振動数のところで

は、鏡自身の熱振動や吊した鏡の振り子運動の熱振動が支配的になる。すなわち、これらの振動を、異なる共鳴振動数をもつ多数の振動モードに分解して考えると、一つ一つの振動モードの熱的な変位雑音のエネルギーが、絶対温度 $T$ に比例し、振動モードの機械的 $Q$ に反比例する（変位振幅は、 $T/Q$ の平方根に比例する）。ここで、機械的 $Q$ とは、振動のエネルギーを1回の振動で散逸するエネルギーで除して $2\pi$ 倍したもので、内部損失を表す指標である。電気共振回路で定義される $Q$ に対応する。一つの振動モードに割り当てられる熱エネルギーはボルツマン定数を $k$ として $kT$ であるため、機

械的Qが高ければ高いほど共鳴点での熱的振動振幅は大きくなるが、それ以外の点での振動振幅は小さくなる。つまりQが高くて振動エネルギーが共鳴点に集中すれば、その分それ以外の振動数では小さくなるわけである。鏡の内部振動や振り子の振動の共鳴点は、いずれも観測帯域には存在しないように設計されるが、振り子のファイバーの弦振動の共鳴点がいくつか入って来ることは避けられない。

図3（グラビア参照）は低温鏡の概念的な図を示している。すなわち、自由質点とみなされるように吊るされた鏡は、何段もの防振装置を介して設置され、鏡の周囲は2重の熱放射遮蔽板で覆われている。長い真空ダクト部分は室温であるが、冷却部分までの10 m以上の長さにわたって熱放射遮蔽が施される。熱は熱伝導により逃がされる構造である。解決すべき問題は、

- 1) 発熱のある鏡をどうやって冷却するか
- 2) 冷却のために付加する新たな装置のために鏡の機械的Qが小さくならないか
- 3) 室温の真空ダクト部分からやってくるガス分子が冷却された鏡に降り積もり、鏡の反射

率が低下しないか

- 4) 鏡の位置制御をどうするか  
などである。

現在世界の干渉計に広く使用されている人工石英材料は、屈折率の一様性が高く、光の吸収損失が小さいなど光学特性の優秀さでこれに勝るものは見当たらないにもかかわらず、低温でQが悪化するため使用できないことがわかっている。低温でQが大きくなる幾つかの材料の中にサファイヤ結晶がある。サファイヤ結晶は、光学的に複屈折をもつため、結晶のc軸方向に光を通すように用いる必要があるが、機械的Qが低温で増加する性質や熱伝導率が室温に比べ20 K付近では2桁以上増大する利点などがある。このサファイヤを鏡の材料として選定し、サファイヤ鏡の懸架ファイバーとしてサファイヤの結晶ファイバーを用いることにした。この基本的な懸架システムを用いて、上記項目1)及び2)を実験的に調べた。

項目1)に対する実験では、熱絶縁体であるテフロン台に載せられたサファイヤのロッド（直径10 cm、厚さ6 cm）に長さ40 cm、直径250 μmのサファイヤ結晶ファイバーを2本、半回転ほど巻

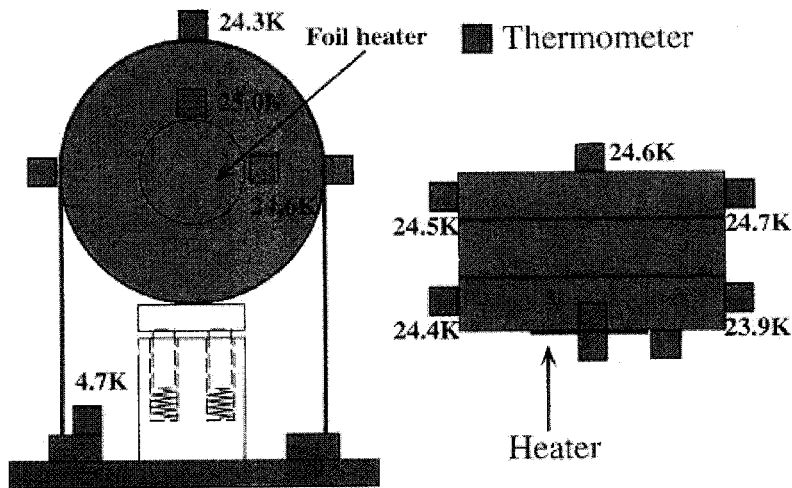


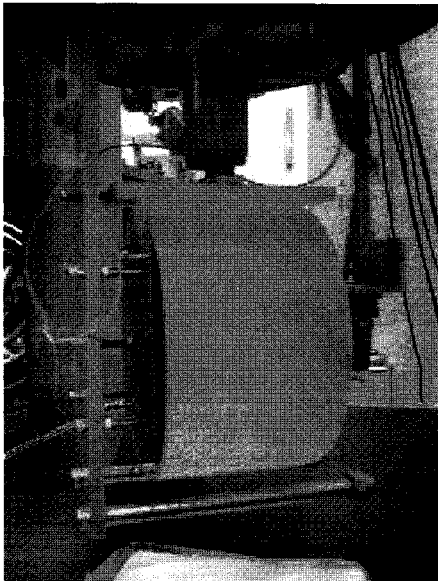
図4 鏡の発生熱を逃がす実験 鏡となるサファイヤロッドに巻き付けられたサファイヤ結晶ファイバーにより有効に冷却できることが示された。

き付け、ファイバーの4つの端を液体ヘリウム温度の金属板の台座に固定した(図4)。サファイヤロッドの中央部分には、発生熱を模擬するヒーターを取り付けた。台座、サファイヤロッドの数カ所に温度計を取り付け、真空容器に収め、その真空容器を液体ヘリウムに浸して冷却する。全体が液体ヘリウム温度(4.2 K)になったところで、ヒーターに電力を入れ、各部の温度の上昇を計測する。電力を2 mW から 30 mW まで変えて平衡する温度を測る。その結果、ファイバーとロッドの間にわずかに熱抵抗があることが判明したが、現実の干渉計で推定される発生熱を首尾よく逃がすことができ、鏡の温度を20 K 前後に保つことができることがわかった<sup>11)</sup>。

次に項目2)の実験として、懸架状態でのサフ

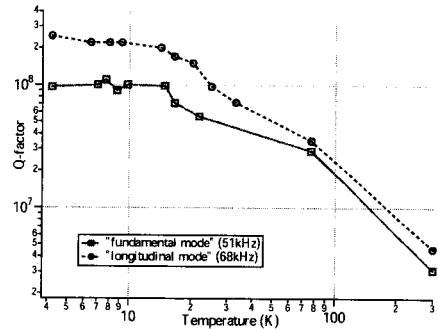
アイヤロッドの機械的Qの大きさを測った。これには、ロッドの機械的な振動モードを励起させ、その自由振動の減衰時間を計って求める。ロッドのような弾性体の共鳴点は無限にあるが、ここでは、干渉計の雑音に最も影響を与える、軸対称な振動モードで最低次モード(51 kHz)とその次のモード(68 kHz)のQを温度を下げながら計った。その結果、2つのモードとも、室温のQが $10^6$ であったのに対して20K以下では $10^8$ を与えることが分かった<sup>12)</sup>。

また、懸架された鏡の振り子としても熱的な振動をもつため、振り子の振動モードのQも測定する必要がある。振り子の周期は1 Hz程度であるため、実は、この直接測定は容易ではなく、これに代わる方法として、結晶ファイバーの機械的Qを



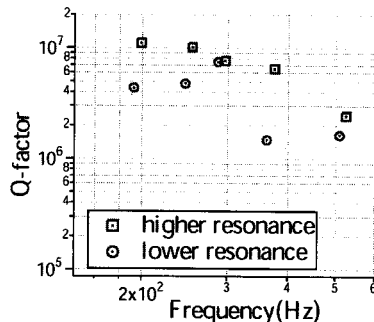
### Cryogenic mirror suspension

(A sapphire mirror was suspended by sapphire fibers.)  
Photograph of Q-factor measurement of the sapphire mirror.



Q-factor of the sapphire mirror.

( $10^8$  was achieved in cryogenic temperature!!)



Q-factor of the sapphire fiber at 6K.

( $10^7$  was achieved in cryogenic temperature!!)

図5 低温での機械的Qの測定 懸架された状態でのサファイヤロッドの機械的Q及び振り子モードのQを推定するのに必要なファイバーのQを測定した。いずれも低温で熱雑音が確実に下げられるという推定を可能にする結果が得られた。

測定した。これは、振り子振動の機械的損失がファイバーの付け根での曲げによる損失に基づき、機械的損失が周波数に依存しない、という性質を利用している。ただし、振り子の場合、振動の重力エネルギーの出し入れには機械的損失が伴わないので、振り子のQはファイバーの実測されたQに、重力エネルギーをファイバーの弾性変形エネルギーで除した数百というファクターを乗じたものとして求められる。ファイバーのQは、低温で一端を固定して振動させ、その減衰時間を計って求める。振動は、光のファイバーであることを利用して、固定された根本に光ダイオードで光を照射し、自由端側から出てくる光の強さから検出する。この方法で得られたファイバーのQは期待通り周波数にほとんどよらずに $10^6$ の程度であった。これから、振り子のQについてもLCGTの実現を阻むものではないことが示された(図5)<sup>13)</sup>。

次に、室温のガス分子が冷却された鏡の表面を汚染する問題について述べる。熱放射遮蔽板(筒)によってガス分子は鏡面にほとんど垂直に近い角度で飛び込んで来る。その影響は反射率の測定によって知られるが、その反射率は、対向した高反射率鏡で光共振器(Fabry-Perot共振器)を構成し、そのフィネス計測から求められる。2つの鏡の反射率をそれぞれ $r_1, r_2$ とすると共振器のフィネスは、 $\pi \sqrt{r_1 r_2} / (1 - r_1 r_2)$ である。共振器は低温状態に置かれ、一方の鏡の表面は室温の真空槽壁面から直接見えるように熱放射遮蔽板に窓を作る。計測スタート時のフィネスは27000強であり、2ヵ月後のフィネスはそれよりわずかに減少した27000であった。この変化の時間スケールは、ガス分子が降り積もる速度から見積もられるスケールと合致している。このような時間スケールでの汚染は、干渉計の運用で十分対応できるものであり、低温干渉計実現への障害ではない<sup>14)</sup>。

最後に項目4)に関する実験では、鏡を制御するための力を出すアクチュエータとして、超伝導の磁石薄膜を鏡面に蒸着し、対向する位置にソレノ

イドを設置し、マイスナー効果による磁力の反発力を利用する。これは、静電気力によるアクチュエータよりは力の範囲が大きく取れるメリットがある。

以上述べてきたように、現時点では低温鏡の実現を阻む基本的障害はないと考えられる。これらの技術のR&Dと平行して、サファイヤ材料の光学的な性質を上げるために必要な研究が、KEK低温工学センターや電気通信大レーザー研の研究グループとの共同研究により進められ、また、サファイヤの研磨、成膜などの技術についてTAMA300の鏡製作を担ってきたメーカーの協力を得て研究が進められている。また、新しい形式の高出力レーザーの開発が、東京大学新領域創成科学研究科に属する重力波チームにより取り組まれている。宇宙線研究所の柏キャンパスでは、より現実的な低温鏡の懸架装置の開発実験を行っている。

## 5. LCGTの完成で期待される成果

地球上に置かれた独立な方向を向く3台の検出器があれば、重力波源の位置を定めることができる。LCGTが完成すれば諸外国の検出器と合わせて重力波観測網を構成することとなる。2重中性子星の合体の場合には、より正確にそこまでの距離も決められるため、従来の距離測定の校正に応用できる。このようにこれまでの天体観測の手段に相補的な手段を提供できることとなる。

以上では、検出が確実と見なされる2重中性子星の合体をターゲットとして述べてきたが、重力波イベントとしてはこれ以外にいくつかのものが予想されている。LCGTでは、より低い周波数まで感度を持つため、中性子星程度の質量ではなくもっと重い、例えば、2重ブラックホールなどの合体の重力波検出を想定することもできる。その場合、重力波は、2つのブラックホールが公転運動しながら近づいていく過程で放出される重力波、くっつく過程で放出されるもの、くっついて一体化したブラックホールが振動して放出されるものと3つの場合に分けて考えられる。最初の過程の重力波の強さ

は、質量の3分の5乗に比例して大きくなるので、例えば、 $10^3$ 太陽質量のブラックホール同志の合体では、中性子星の場合に比べて単純に5桁強い波が出る。その際、周波数は2桁近く下がり、LCGTの観測帯域より低い周波数のところに信号のピークが移るため、単純ではないが、詳しい計算によれば、1 Gpcの距離まで十分高い信号対雑音比で検出できる。さらに一体化した後のブラックホール振動は、もし、ブラックホールの質量が太陽質量の千倍あれば、数百という高い信号対雑音比で検出できる見込みである<sup>15)</sup>。

また、発生頻度の高い超新星爆発の際の重力波については、信号波形についての情報が不足しているために重力波としての同定が難しい側面があるが、これが克服されれば乙女座銀河団の距離までのものが観測できるという見込みがある。パルサーからの連続波については、かにパルサーが60 HzというLCGTの観測帯域に入るところにあり、これまで共鳴型アンテナでつけられた重力波の制限をさらに押し下げることができる。なお、我々の銀河系の中でのX線星連星からの連続波検出の可能性も指摘されている。

以上の他、まだ理論的に予測されていない重力波が捉えられる可能性も0ではなく、LCGTが完成すれば、文字通り重力波天文学が誕生することになるだろう。

## 参考文献

- 1) K Kuroda., et al., 1999, *Int. J. Mod. Phys. D* 8, 557
- 2) J H. Taylor., J M. Weisberg., 1989, *Astrophysical J.* 345, 434
- 3) K S. Thorne., 1987, in 300 years of gravitation, ed. S W. Hawking., W Israel., Cambridge University Press, p.330
- 4) E S. Phinney., 1991, *Astrophysical J.* 380, L17
- 5) P R. Saulson., 1994, in *Fundamentals of interferometric gravitational wave detectors*, World Scientific, p. 71
- 6) M Ando., et al., 2001, *Phys. Rev. Lett.* 86, 3950
- 7) A Abramovici., et al., 1992, *Science* 256, 325
- 8) A Brillet., 1998, in *Proc. 2nd Amaldi Conference, Gravitational waves*, World Scientific, p87
- 9) K Danzmann., et al., 1994, *Max-Planck-Institut fur Quantenoptik Report*, p190
- 10) K Kuroda., et al., 2001, in *Proc. 4th Amaldi Conference*, to be published.
- 11) T Uchiyama., et al., 1998, *Phys. Lett. A* 242 211
- 12) T Uchiyama., et al., 1999, *Phys. Lett. A* 261, 5
- 13) T Uchiyama., et al., 2000, *Phys. Lett. A* 273, 310
- 14) S Miyoki., et al., 2000, *Cryogenics*, 40, 61
- 15) H Tagoshi., 2001, in *LCGT design meeting*.

## LCGT

### — Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope —

**Kazuaki KURODA**

*ICRR, The University of Tokyo 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8582, JAPAN*

Abstract: The objective and R&D experiments for LCGT project are presented for the detection of gravitational wave events.