



記載の記事は宇宙線研究所ホームページ (http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/ICRR_news) からでも御覧になれます。

CONTENTS

XMASS 実験の現状報告	山下 雅樹	1
神岡低温レーザー干渉計 CLIO の現状	三代木伸二	5
人事異動		12
ICRR-Seminar		12
ICRR-Report		12

研究紹介

XMASS 実験の現状報告

山下 雅樹

【宇宙線研究所】

1. はじめに

XMASS (エックスマス) 実験は、暗黒物質直接探索をはじめとし、低エネルギー太陽ニュートリノ、また、2重ベータ崩壊探索を掲げた多目的実験である。XMASS の由来は、

- ・ Xenon detector for weakly interacting MASSive Particles (暗黒物質探索)
- ・ Xenon MASSive detector for solar neutrino (pp/7 Be 太陽ニュートリノ)

・ Xenon neutrino MASS detector (2重ベータ崩壊) と希ガス液体シンチレータである液体キセノンを検出器媒体とし、神岡鉱山の地下1000メートルに設置して極放射性バックグラウンドの環境で稀な事象を観測する。XMASS 実験の計画は大きく三段階に別れる。(図1) 既に終了した100kg 液体キセノンを用いた R&D、現在準備を進めている800kg を用い

た暗黒物質に特化した検出器、また、将来では20トンサイズの検出器が計画されている。2008年には、実験を行う空洞及び放射性シールドに用いられる水タンクが完成し、現在、急ピッチで検出器の準備が進められている。本稿では XMASS 800kg 検出器の紹介、またその準備状況、そして期待される物理的結果を述べて行く。

2. 暗黒物質直接探索

最近の観測で明らかにされた非バリオン暗黒物質の証拠は多岐に及ぶ。[1] 例えば WMAP 衛星の宇宙背景マイクロ波観測によると非バリオン暗黒物質は宇宙の質量の約23%を占めているとされ、その正体を解き明かそうと暗黒物質検出の意義はますます高まっていると言える。暗黒物質の存在が指摘され始めたのは1933年の F. Zwicky に遡る。彼はかみのけ銀河団の赤方偏移による観測から目に“見える

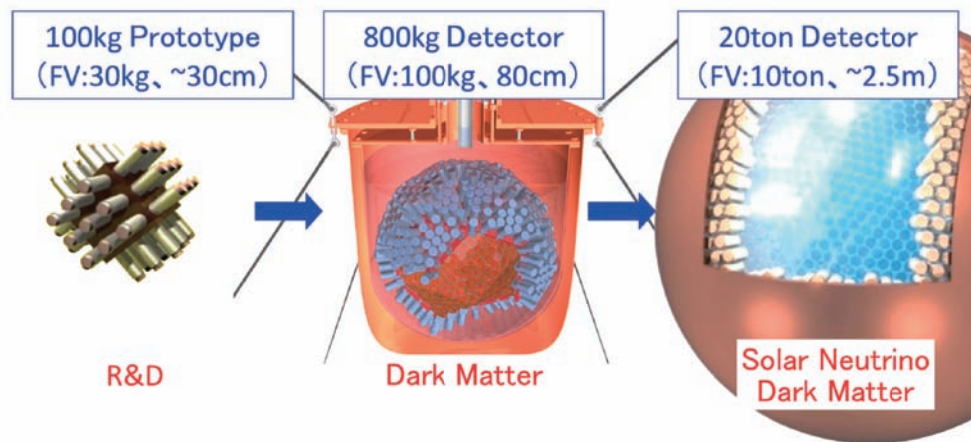


図1：XMASS 実験計画。現在では R&D は終了し、暗黒物質直接探索に向けて800kg 検出器の準備が進められている。将来計画として低エネルギー太陽ニュートリノも視野にいたれた20トンサイズの検出器が考えられている。

物質”だけでは銀河団が平衡状態にあるのは難しく、重力を感じるが“目に見えない”物質の必要性を示した。この“目に見えない”物質が暗黒物質と呼ばれる。現在の宇宙は、銀河、銀河団、何もない空洞などが複雑に連なった大規模構造を形作っていることが分かって来た。これは、初期の宇宙の僅かなゆらぎからダークマターの密度に差が生じ、密度の濃いところは重力によってさらにダークマターを引き寄せていき、しだいに目に見える物質であるチリやガスも引き寄せ、やがて星や銀河が形成されていったと考えられている。このように暗黒物質は宇宙の成り立ちに非常に密接に関わっていると考えられており、物質の正体は分かっていないが、観測事実からいくつかのその性質が推測される。特長としては、電荷を持たず、冷たく（非相対論的速度）、また、安定であることで、しばしば Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) と呼ばれている。このような粒子は、標準理論では説明できないが、超対称理論で予想されている新しい粒子、ニュートラリーノが候補となる。ニュートラリーノは、超対称粒子の重ね合わせからなる粒子である。ニュートラリーノの質量は超対称粒子の中で最も小さく（陽子質量の100-1000倍程度）安定していると考えられている。このような観点から暗黒物質問題は、宇宙物理学だけでなく素粒子物理学にとっても重要な課題と言える。現在では、10以上の探索グループが存在し、欧米アジアの地下実験施設で探索が行われており、激しい国際競争の中にある。

太陽系での暗黒物質の局所的な密度は、約0.3 $\text{GeV}/c^2/\text{cm}^3$ と見積もられる。この粒子は光の速度の約1000分の1で飛んでいると考えられ、1秒間に100万もの数が人間サイズの体積を通過しているが、

通常の物質との相互作用は非常に稀にしか起こらない。超対称論に 10^{16} GeV で力が統一するという制限を加えた Constrained MSSM に基づく計算によると、通常の物質と相互作用するイベント頻度は、0.1から0.00001 event/kg/dayと非常に少なく、核子との散乱断面積にして $10^{-42} - 10^{-46} \text{cm}^2$ となり、探索する領域は広い範囲が予想されている。[2]

WIMP と核子の弾性散乱はイベント頻度が稀である上に、反跳核のエネルギーが10keV 程度と小さい。その断面積は原子核のスピンに依存しない項と依存する項に分けられる。スピンに依存しない場合は、コヒーレントに相互作用するため、散乱断面積は検

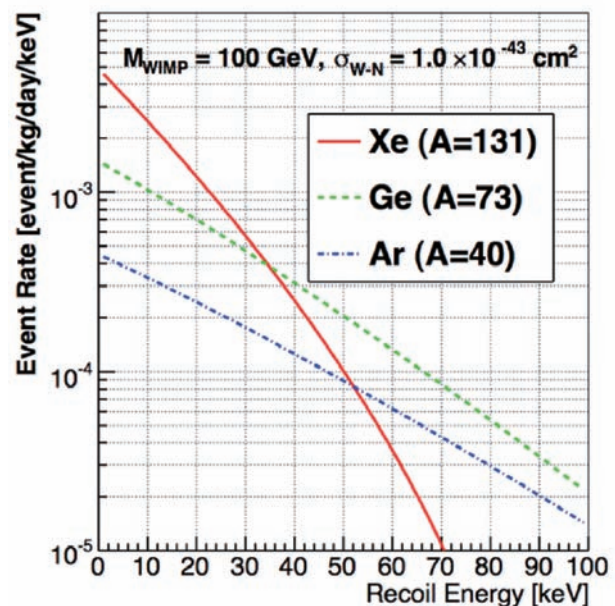


図2：WIMP による原子反跳エネルギースペクトラム。WIMP 質量100 GeV、散乱断面積 $1.0 \times 10^{-43} \text{cm}^2$ を仮定し、検出媒体がそれぞれ Xe、Ge および Ar の場合を示す。

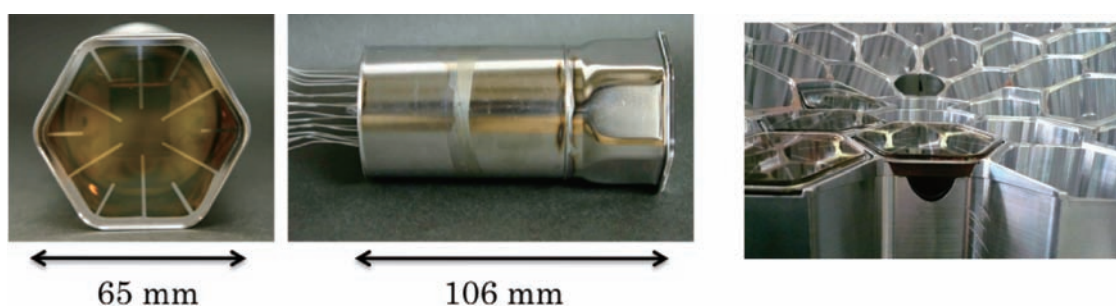


図3：XMASS 実験用“極低放射能”光電子増倍管（Hamamatsu R10789）。真空紫外光である液体キセノンからのシンチレーション光を効率よく捉えることができる。右写真は実寸模型の光電子増倍管ホルダーに取り付けた所。

出器媒体の質量数を A とすると A^2 に比例する。また、スピンの依存する場合は検出媒体に奇数の質量数を持つ原子核が必要で、断面積はその核構造に左右される。図3に典型的な検出媒体と WIMP の弾性散乱（スピンに依存しない場合）の反跳エネルギースペクトルを示す。なお、WIMP の質量を $100\text{GeV}/c^2$ 、散乱断面積を $1.0 \times 10^{-43} \text{cm}^2$ と仮定してある。図1から分かるように、エネルギー閾値を十分に下げることができれば、キセノンのような大きな質量数の検出媒体が有効であることが分かる。

3. 大型極低バックグラウンド液体キセノン検出器

キセノンは原子番号54の希ガスの一種で、常温ではガスの状態であるが、およそ -100°C まで冷却すると密度 $3\text{g}/\text{cm}^3$ の液体となる。よって、検出器は冷凍機によって常に低温状態で保たれる。液体キセノンを用いる利点は、発光量が多く（ $46000 \text{ photon}/\text{MeV}$ ）、密度が高くコンパクトにトンクラスの大型化が可能、また液体、気体、固体の各相が利用できるため多様な純化方法を取ることができるなどである。特に、有機シンチレータに含まれる炭素14を含まないため、低エネルギーの pp -ニュートリノが検出できるものと期待される。

イベント頻度が稀であるので、実験では如何に放射性バックグラウンドの海をかいくぐるかにかかっている。通常、外部からの放射線バックグラウンドに対して、ガンマ線を遮蔽する鉛や銅、高速中性子に効果的なポリエチレンや水を使用する。しかし、要求される感度は高く、最新の注意を払って選定したとしても、そもそも検出器の素材に含まれるウラン・トリウム等の天然放射性物質からの内部バックグラウンドだけでも限界に達してしまう。この問題を解決するのが液体キセノンによる“自己遮蔽”である。例えば、直径約80cmの800kg 検出器では中心の直

径40cmのイベントを限定することで外部からのガンマ線バックグラウンドを大幅に減らし、WIMP 探索エネルギー領域である 100keV 以下ではバックグラウンドを4桁ほど落とすことが可能である。

4. 研究の現況

現在では、中期の目標である、液体キセノン800kgの暗黒物質探索装置の制作に取りかかっている。図1中央はそのイメージ図で約800kgの液体キセノンが642本の光電子増倍管で球状に囲まれている。XMASS グループでは、この実験に特化した“極低放射能”光電子増倍管を浜松ホトニクスと共同で開発した（図3）。初期のバージョンよりも数十倍放射能の低減に成功しており、低バックグラウンド Ge 検出器を用いて材料選定を繰り返すという地道な作業で歳月にしておよそ10年かかっている。この光電子増倍管は、液体キセノンの温度で動作することはもちろん、発光波長 175nm において、高い量子効率効率（28-39%）が実現されている。およそ700本の光電子増倍管の納品が完了しており、検出器への導入前に性能最終確認が研究者によって行われている。

2007年には、神岡鉱山内に新しい実験室の掘削作業が終了し、2009年に初めに、直径10m 高さ10mの水シールド用タンクの建設が終了した。（図4）現在では検出器およびそれに付随する配管が製作中で、2009年12月設置完了を目指し、グループ丸となって準備を進めている。データ取得は2010年から開始され、予想される暗黒物質に対する結果は従来の最も厳しい制限を与えている CDMSII [3] や XENON10 [4] よりも二桁程良い感度が期待されており、散乱断面積にして、 10^{-45}cm^2 と超対称性理論で予想される領域を大きく踏み込むことができるであろう（図5）。

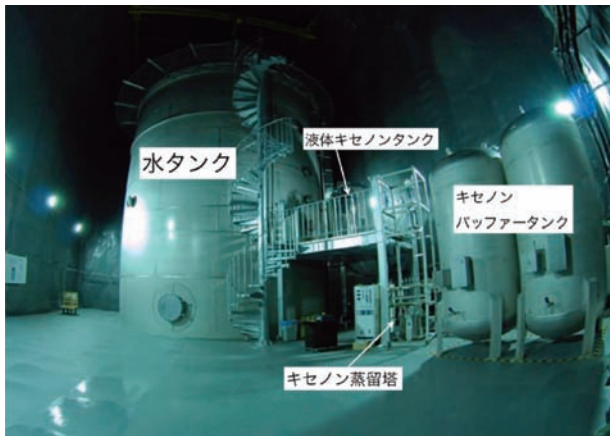


図4：神岡坑内・実験室C。水タンクの内部に検出器は設置される。

参考文献

- [1] D. N. Spergel, et al.: *Astrophys. J. Suppl.* 170 (2007) 377,
M. Tegmark, et al.: *Phys. Rev. D* 74 (2006) 123507.
- [2] L. Roszkowski, et al.: *JHEP* 07 (2007) 075, hep-ph/0705.2012,
J. Ellis, et al.: *Phys. Rev. D* 71 (2005) 095007.
- [3] Z. Ahmed et al., *Phys. Rev. Lett.* 102, 011301
- [4] J. Angle, et al.: *Phys. Rev. Lett.* 100 (2008) 021303,

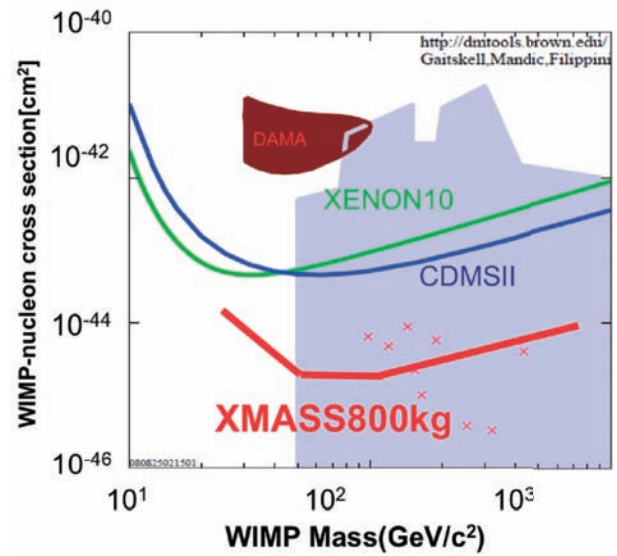


図5：スピンの依存しない場合のWIMP-核子散乱断面積の上限値曲線とCMSSMのモデルで予想されるパラメーター領域。CDMSII [3] とXENON10 [4] による制限曲線とDAMAによる信号領域が示されている。XMASS実験で予想される感度は従来の実験よりもWIMP質量100GeVにおいて、およそ2桁良いことが期待されている。

研究紹介

神岡低温レーザー干渉計 CLIO の現状

三代木 伸二

【宇宙線研究所】

日本の次世代大型重力波望遠鏡計画である LCGT 計画の実現を目指して開発を行っている低温レーザー干渉計 CLIO の現状と、その技術的背景について紹介させていただく。

1. 地上の楽園？地下環境

地球上に設置された次世代大型レーザー干渉計重力波アンテナの感度を制限する雑音は三種類ある。その内の二つは実は一つなのだが、それはレーザーの光子量子不定性から決まるショット雑音と輻射圧雑音であり、この二つが重力波の観測帯域をほぼ支配する。三番目が、光を打ち返す鏡を、常微振動している地球上に設置しなければならない必然的配置により導入される地面振動雑音である。例えば、図 A は LCGT 計画で目標とする変位感度曲線である。図 A のように、地上重力波アンテナの目標とする目標変位感度は、100Hz 付近で 1×10^{-20} [m/√Hz] であるが、都市部地表面では 10^{-11} [m/√Hz] もある（図 B 参照）。すなわち、目標感度達成のために、鏡を 9 桁も地面振動から防振しなければならない。そこで、重力波アンテナでは、地面を基点とし、鏡を振り子状に懸架している。その一つの理由は、鏡が振り子の共振周波数以上で自由質点として擬似的に振舞うようにするためである。もう一つは、振り子の伝達特性を利用し、地面振動からの防振を行う

ためである。但し、その 9 桁を埋めるために、振り子は多段構造（現デザインでは、縦方向 4 段、横方向 6 段）となっており、その振り子に付随する様々な共振周波数での励起振動を、センサーを利用した能動制御や、磁石と非磁性金属間に働く渦電流力による反力を利用して抑圧する工夫が施されている。当然ながら、その励起力の起源たる地面振動は、もともと小さいに越したことはない。例えば、神岡鉱山内のような地下環境においては、図 B のように、地表よりも二桁小さい 3×10^{-13} [m/√Hz]@100Hz 程度が得られる。ここで普通なら、「たった二桁では焼け石に水、神岡に穴なんか掘らないで、制振技術で克服できるだろう」とほとんどの人が思うに違いない。しかし、レーザー干渉計型重力波アンテナを重力波望遠鏡として動かすには、その「干渉計」という名の通り、光の干渉による明暗のフリンジから、長さ変化（重力波であって欲しいが）に比例する信号を読み出し、それを元に鏡に力を加えることで、干渉フリンジを定位点に留めたり、Fabry-Perot (FP) 共振器の共振を維持するフィードバック制御をしなければならない。しかし、次世代大型レーザー干渉計重力波アンテナでは、3～4 km の基線長を持つフィネス 1000 強の FP 共振器（Cavity Pole は約 20Hz !）を共振させる必要がある。しかし、共振する瞬間、つまり、レーザーの半波長の距離を、

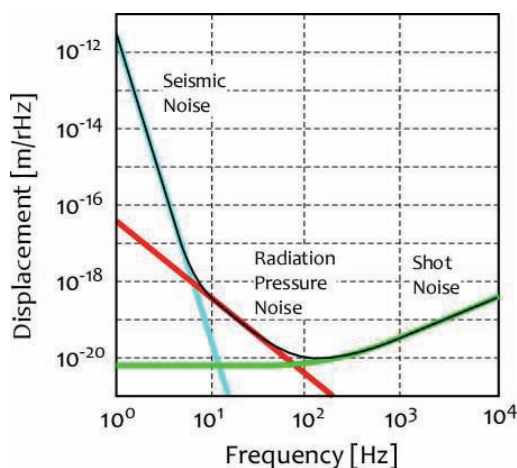


図 A : LCGT 変位感度

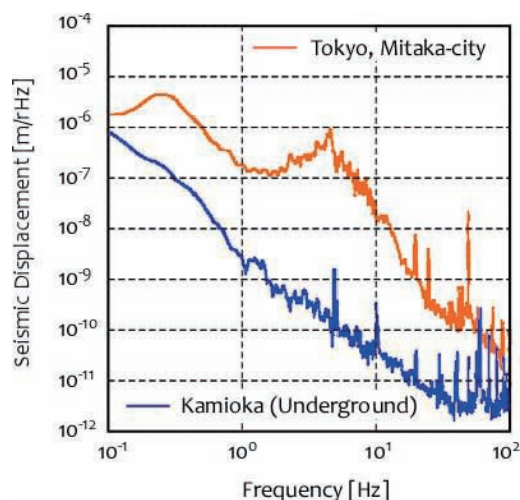


図 B : 地面振動比較

鏡の移動速度と、おおよそフィネスで割って得られる時間にしか信号がでてこない。しかも、鏡は速度を持っているので、鏡で反射するレーザー光線の周波数は、反射の度にドップラーシフトを起こし、結果、FP 共振器からえられる干渉光は、いわゆる「ビート」という波打つ形状になる [論文 1]。そのため、速度がある値を超えると、鏡の変位に比例した電圧信号自体が得られない状況が劇的に発生する。その境界速度は、共振器の光の滞在時間が長いほど小さくなるが、その鏡の速度を支配しているのは、実は、約 1 Hz 以下の地面振動である。よって、先に述べた地表と地下の間の地面振動のこの二桁こそが、感度への直接的貢献よりもはるかに重要になってくる。

もちろん、重力波業界では、この問題を克服するため、超低周波鏡防振装置の開発も行われている。設計指針は簡単で、鏡は振り子の共振周波数以上でしか防振できないのだから、その共振周波数を下げれば観測帯域での防振比はその分向上するはずだという算段である（注：実際は、現在提案されている超低周波防振装置の機械的構造は、剛体振り子がベースになっているので、実際の防振比率は、その超低周波振り子の共振周波数の100倍から1000倍程度の周波数で向上しなくなる。その防振比が「頭を打つ」周波数をできるだけ上げる工夫もいくつか考案されている）。例えば、VIRGO グループは、super-attenuator という高さ 7 メートル強もある巨大防振装置を開発した [論文 2]。super-attenuator では、運動の自由度にもよるが、0.1Hz から 0.01Hz 付近に共振周波数をもつ振り子を多段に導入し、かつ、その超低周波数帯域に感度のある加速度計（傾斜計）LVDT を開発し、それをセンサーとして振動や共振を抑制するシステムとなっており、実際、100Hz から 10Hz までの変位感度に関し世界最高を達成している。しかし、現状では、その LVDT の雑音レベルは神岡地面振動レベルに及んでいない（現状の LVDT のダイナミックレンジは cm 程度で、雑音レベルは 10^{-8} [m/√Hz] であるが、ダイナミックレンジを絞る設計にすれば高感度化は可能である）。

また、地面振動は、このような定常的な振動だけではなく、天候（風、雨、波浪）や人間の活動により、そのレベルは大きく揺らいでおり、それはレーザー干渉計を重力波観測装置として継続的に運転することの大きな障壁になっている。その点に関しても、我々はこの CLIO に先立って、東京都三鷹市にあった 20mFP 型レーザー干渉計を神岡鉱山内に移設し、その感度の変化と継続的運転に関し前もって調査し、実際、感度の向上はもちろんのこと、連続

一週間の継続運転を達成し、地下環境の優位性を確認している [論文 3、4]。

2. 鏡を冷やしながら防振する

では、我々 CLIO の鏡の防振装置であるが、それを図 C に示す。他との最大の相違点は、一つながりの防振装置が、常温の部と低温の部に別れている点であり、かつその低温部が常温部から懸架された全体で 6 段の多段振り子になっている。常温部は、銅製の円形の穴あき平板が、放射状に配置されたコの字状に成型されたベリリウム銅製の板ばね 6 枚により懸架された振り子を 2 段分用意し、さらにその下に、低温部の振り子全体の姿勢制御（Pitch、Yaw、光軸併進、光軸直行併進、垂直併進）をするためのステージを格納したケージを、同様にベリリウム銅製のばねで懸架した、計 3 段の振り子になっている。各段は、直前の段に固定されたネオジウム磁石による発生するアルミ板内の渦電流による抵抗力でその共振振動が抑制されている。ベリリウム銅製のばねは、コの字水平部は、長二等辺三角形にすることで垂直方向への「柔らか」な復元力を確保する一方、その鋭利頂点を結ぶ垂直部を細線にすることで、ねじれ方向への「柔らか」な復元力を確保している。また、成型の後、アニールすることでその強度を保持している。こうした板ばねを放射状に配置することで、縦横両方向に対し防振効果が得られるように工夫されている。この常温部の振り子が固定されている光学常盤には、下にあるクライオスタット部と空間的に通じる穴が開いており、その穴に、方端がステージに固定された直径 100 マイクロメートルのワイヤー 4 本を通し、クライオスタット内部で 10K 付近まで冷却された振り子部が懸架されている。それとは別に、同じステージから、この低温部振り子の動きを Eddy Current ダンプするための磁石用の銅剛体も懸架されている。常温部と低温部の温度差は 280 度もあるが、CLIO では、この温度差を繋ぐワイヤーとして Bolfur（ボルファー）というアモルファス素材を使用している。Bolfur はユニチカ社の製品で、伸縮性に富むアモルファス金属ワイヤーで、これにより、ワイヤーのみで縦横の防振、及び断熱を同時に行っている。低温部の振り子は、Bolfur のもう一つの方端が固定される銅製の剛体、そこからまた放射状に配置されたベリリウム銅製の板ばねで懸架された銅製の剛体があり、そこから、最終的には、直径 150 マイクロメートルのサファイアファイバー 4 本（実際は、2 本のファイバーをループ状に巻いている）により、サファイア基材ででき

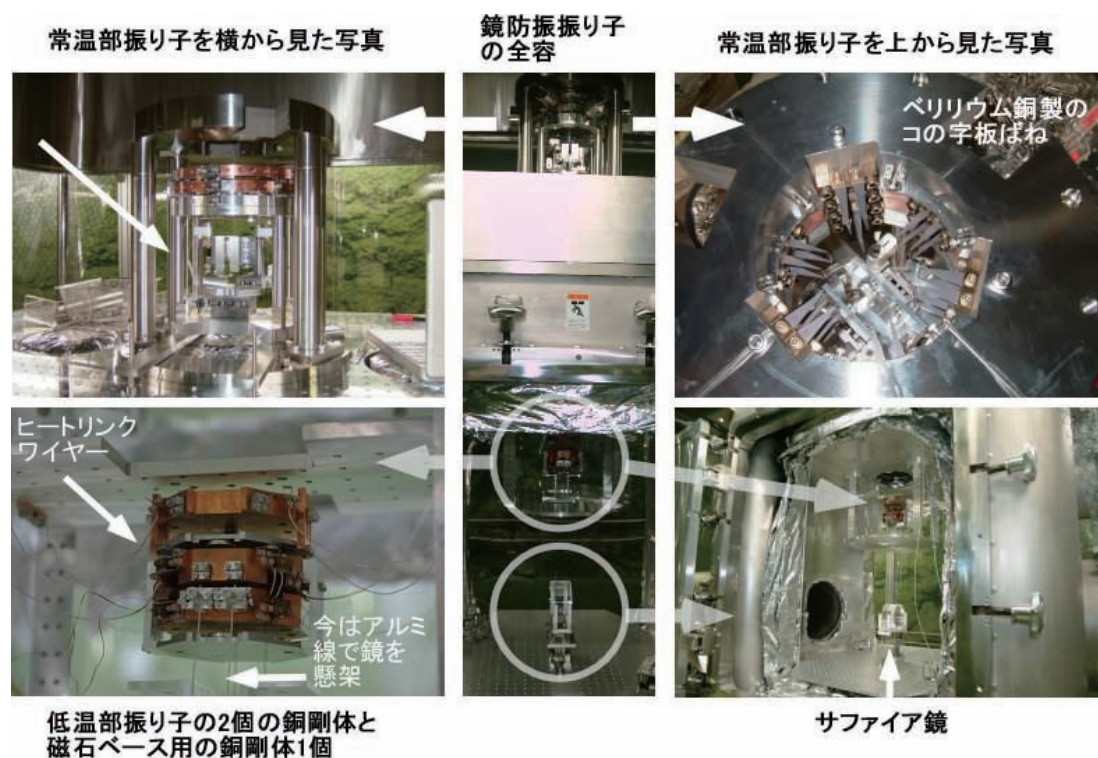


図 C : CLIO 防振装置

た鏡を引っ掛けるように懸架される。

ところで、クライオスタットに入れたからといって、低温部の振り子や鏡はこのままでは全く冷却されない。そもそも真空中での冷却においては、輻射による熱輸送は絶望的に小さく、かつ、ヘリウムガスを導入する間接的ガス冷却は、鏡の反射性能を劣化させるために使用はできない。さらには、鏡でFP共振器を構成する都合上、鏡前後方には解放部が必要で、必然的に常温部からの熱輻射を常時直接的に浴びる構造になっている。そのため、銅の剛体以下の冷却は、熱伝導に頼るしかない。実際 CLIO では、最初の銅剛体と 8 K 程度に冷却されたクライオスタットの内側シールドとの間に、大きな曲率で巻いた直径0.5mm の高純度アルミ線（5 Nine クラス）を4本接続することで、まず初段の銅剛体を冷却している。その初段の銅剛体と下の銅剛体も同様に、緩く巻いた高純度アルミ線を使って接続することで冷却している。そして、最後の肝心の鏡は、懸架に使用しているサファイアファイバーによる熱伝導を利用し20K 程度まで冷却する。鏡とそれを懸架するワイヤーにだけサファイア素材を利用する理由は[論文5, 6, 7]、冷却することで、低温化だけでなく、同時に機械的なロスが低減する、及び、熱膨張率が格段に小さくなるという相乗効果により、鏡や懸架ワイヤーの熱雑音を効果的に低減させることができるからである（その相乗効果が期待できな

い鏡のコーティングのロスに起因する熱雑音も、最低限、定温化で低減できる）。但し、現在は、まだこの高価で壊れやすいサファイアファイバーは使用せず、直径0.5mm の純アルミ線を代用し、実験を行っている。

3. 大型クライオスタットと超低振動冷凍機の開発

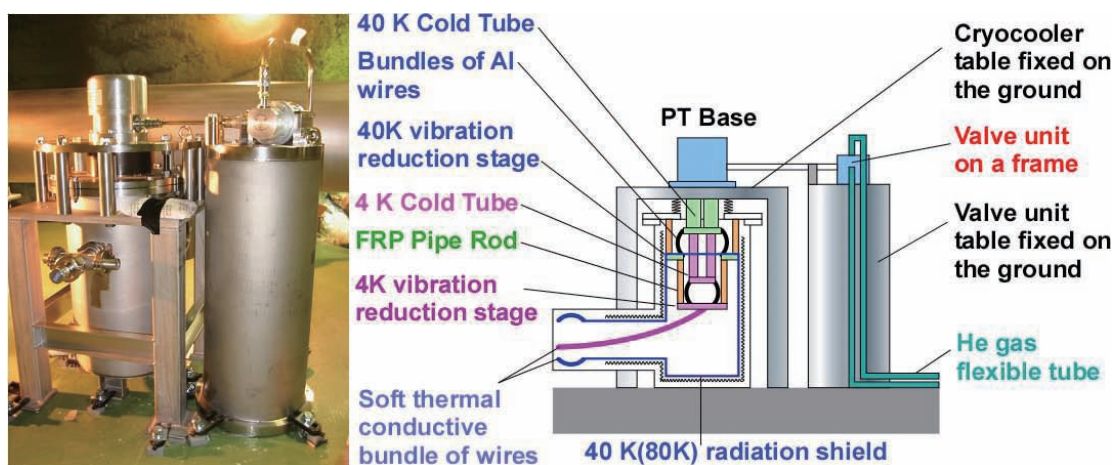
重力波の検出を目的とした装置の最初の形は、共振型というものであった。重力波による潮汐力で励起された共振体（巨大な金属の塊）の共振周波数での振動を検出するという原理である。すでにその装置の頃から、熱雑音が検出限界を決定するものとして認識されていたため、液体ヘリウムを利用し、振り子状に懸架防振された共振体を冷却することは常套手段であった。しかし、同時に、液体ヘリウムが蒸発するときの泡の発生や温度勾配による懸架ワイヤーのきしみが雑音の起源になることも判明し、実は、その軋みと泡による振動低減対策として採用されたのが、前述の Bolfur ワイヤーである[論文8]。しかし、一方 CLIO では、液体ヘリウムの代わりに、昨今、民間需要と冷却性能向上の著しい冷凍機を利用している。それは、利便性や維持管理のやり易さはもちろんだが、最大の理由は、レーザー干渉計型重力波アンテナの鏡の冷却に必要とされるクライオスタットの内部がさらされる、前述の構造に起因す

る桁違いに大きい熱輻射を、現実的に断続的に排熱できる唯一の方法だからである。幸いにも、CLIO 計画に先立ち、ちょうど4.2K 冷却管部の冷却能力が0.5W 程度の二段パルスチューブ型 GM 冷凍機（第一冷却管：～40K、第二冷却管：4.2K）が実用化された。それらは、冷凍能力に不足はないものの、せっかくの低振動環境である神岡鉱山内に干渉計を設置しながら、冷凍機という震動源を放置してよい訳はない。そのため、CLIO では、KEK の低温センターと住友重機械工業社との共同開発により、超低振動二段（及び一段）パルスチューブ型 GM 冷凍機を開発した〔論文9、10〕。その構造図を図Dに示す。

まず、機械的なピストンを冷却管に持つ型は、問答無用で排除され、機械的構造を持たないパルスチューブ型が選択されている。しかし、それでも、冷却管にかかる内部圧力波により、冷却管が膨張収縮するため、圧力波駆動周波数とその高調波の振動レベルは、神岡地面振動レベルの800倍に達している。また、ヘリウムガスで圧力波を発生させる構造上、その圧力波を発生させる機械的ロータリーバルブの部分も振動源となりうる。今回開発された冷凍機では、まず、そのパルスチューブ型冷凍機のヘッド部を金属筐体で神岡の極めて硬い岩盤に固定し、質量比と固定構造の堅牢さでその振動を抑えるようにしている。また、通常、ヘッド部と圧力波を発生させるロータリーバルブは一体なのだが、その振動源たるロータリーバルブをヘッド部から分離し、別の非常に重い金属筐体に固定し、その筐体も岩盤に固定することで、バルブ部の振動とその伝播を抑えている。さらに、このヘッド部と冷凍機の冷却管部を囲う真空タンク部は、岩盤に対し別々の構造体で固定されるようになっており、ヘッド部で発生する

振動が、クライオスタットに繋がっている真空タンク部に伝わりにくくされている。さて、最も問題となる冷却管部の振動であるが、二段ある冷却管部の周りに、常温部との熱伝導を遮断しながらも、神岡の地面に固定された真空タンク側面に固定される構造を持つ「減振ステージ」を構築し、冷却管とその減振ステージの間を高純度の細い銅線を束ねたより紐状の金属束十数本で接続している。結果、ヘッドの振動エネルギーをより紐構造で奪いながら、大きな熱伝導性を確保することが可能になり、その減振ステージ部の振動を、論文9の様に減衰することに成功した。現在は、その減振ステージの防振と伝熱効果をさらに上げるため、銅線を5ナインクラスの純アルミ線（住友軽金属社製）に交換する試みを行っている。

一方、常温部から鏡への熱輻射を低減させるためのクライオスタットだが、前述の通り、鏡によってFP共振器を構成させる都合上、鏡の前後方とも、最低限、鏡の直径だけは常温真空部に対し開放せざるを得ない。しかもその状態で、防振性能要求を満たすためにトレードオフになっている最低限の伝熱量でしか冷却できない防振された鏡を20K まで冷却させるために、入熱を低減する構造でなければならない。かといって、特に、鏡の高反射面が面している基線長部（CLIOは100m、LCGTは3 km）をすべて低温熱シールドで覆うのは非現実的である。よって、結局、鏡を含むその前後の真空中だけに低温熱シールドを施すことで熱輻射の低減要請を満たす方法くらいしか残っていない。初期設計では、単純に、鏡が見込む常温部分の立体角のみに注目し、そこからの熱輻射量と、そこから鏡に到達する分子による鏡の表面汚染の許容値〔論文11〕をもって要請値と比較した結果、直径20cm、長さ5 mの低温



図D：冷凍機

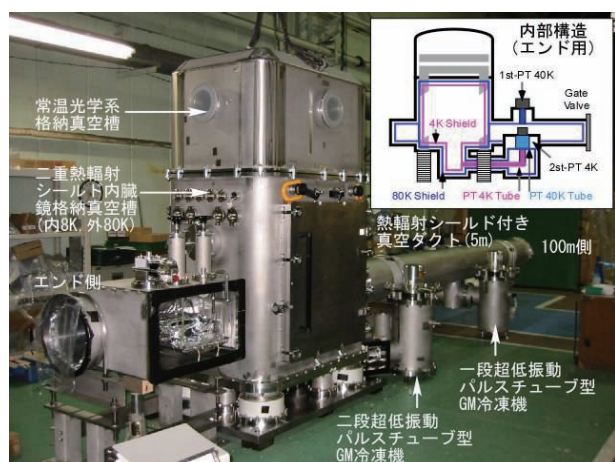


図 E：クライオスタット構造

熱シールドを、鏡を格納する真空タンク部から伸ばして設置すればよいとの結論を得て、東芝社に製造依頼し、図 E のような構造のクライオスタットを開発した。中心部の鏡を格納する部分には、二重に低温熱シールドが施され、外側は70K ほど、内側は8 K ほどに冷却されている。両シールドとも、5 mm 厚の AL1100 のアルミ板を、アルミ蒸着した多層フィルムでその外側を覆う仕様になっている。この両シールドは、その内包外装関係を維持したまま、前述の冷凍機の各減振ステージに結合され、熱伝導のみにより冷却されている。5 m ダクト部も、それぞれ同様な減振機能を持つ40K 一段型 PT 冷凍機で冷却されている。この構造により、クライオスタット中に、6 段防振振り子、及びサファイア鏡を格納した状態で、7 日間で鏡を約30K までに冷却することはできたが、同時に目標の20K 以下にならないという問題が発覚した。理由は、常温部からの熱輻射の見積もりに低温シールド内で反射して鏡に到達する成分が全く考慮されていなかったためであるが、現在、その当時の鏡への実際の熱流入量は、反射を考慮した理論計算と実験的検証の双方により定量的に再現されている [論文12]。常温の黒体輻射の波長は10マイクロメートル付近に中心を持つが、その波長領域に対し、金属アルミの反射率は、今のような斜入射でも90%以上はあり、かつ、鏡の基材であるサファイアはその波長の電磁波をよく吸収するという悪条件を見逃したのはポカというしかない。しかし、LCGT 計画におけるこの熱輻射問題への対策は実は簡単で、単に予定されていた低温熱輻射シールドの中に、熱シールドバッフルを何枚か挿入するか、念のため、鏡の周囲に簡易な熱輻射シールド構造を持たせるだけで解決することが、今回検証された理論計算により示される。CLIO では、5 メート

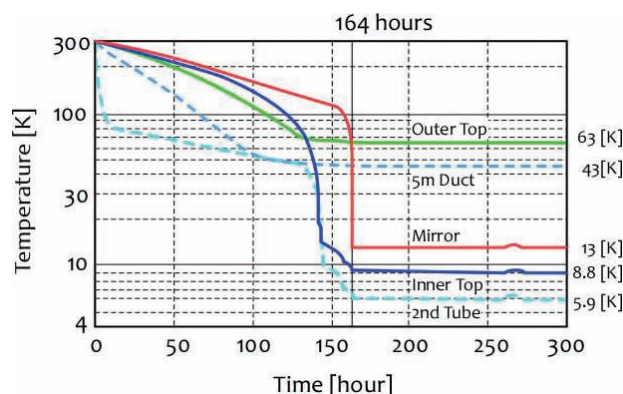


図 F：鏡の冷却の様子

ル低温熱輻射シールドの両端に直径150mm、100mm の穴の開いたバッフルを取り付け、かつ、鏡自身も内側シールド内でさらに箱状の熱シールドに格納することにより、鏡への入熱を50mW 程度に低減し、現在は、4 個の鏡をすべて14K 程度にまで冷却することが可能となり、目標を達成している (図 F)。

4. サファイア細工

先ほどから、当たり前のようにサファイアの鏡のことが話として出てくるが、普通、鏡の基材と言ったら熔融石英であろう。我々の使用するサファイア基材は、宝石のように赤や青に色のついたものではなく、無色透明な単結晶サファイアであり、むしろ、不純物は極限的に少ないほうが望まれ、要求熱吸収上限値は20 ppm/cm である。しかも、CLIO の鏡基材は、直径100mm 厚さ60mm の円筒形 (LCGT では、直径250mm、厚さ150mm) である。このような高品質大型サファイア基材を生産できる企業は今のところアメリカの Crystal Systems 社のみである。しかも、CLIO のサファイア鏡には、表面粗さが波長/20 程度、マイクロラフネスが1 nm 程度を満たす150m (LCGT なら4.5km) の曲率が必要である。大きい曲率もさることながら、ダイヤモンドに次いで硬いサファイアを、この要求にすこしでも近づくように研磨できるのは、もはや、商売度外視でやってくれる職人さんの誇りのみであり、そんな岡本光学社や Canon 社のおかげで今の CLIO の鏡はできており、誠に感謝に堪えない。そのような事態の一助にでもなればと思い、我々も、研磨ではなくコーティング技術により曲率の形成を行う R&D を現在遂行中である [論文13]。

また、鏡にするからには、 $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ の多層膜コーティングを行わねばならない。特に LCGT 計画な

どでは、先のサイズの鏡全面に対し、99.999% 近い反射率を必要とするが、そのコーティング膜による光学的ロス、散乱・吸収をあわせても10ppm 程度でなくてはならない。幸い、CLIO はプロトタイプとして、設計反射率99.9% 設定のため、ロスへの要求は厳しくはないが、100m のFP 共振器のスポットサイズは大きいところで直径16mm (2ω 値) もあるため、この広い領域で低ロスを実現するには非常に高い技術が必要となる[論文14、15]。日本では、日本航空電子社 (TAMA, CLIO)、アメリカでは REO 社 (LIGO と協力)、ヨーロッパではリヨン社 (VIRGO と協力) が行なっている。

さて、CLIO でこのサファイア鏡を懸架するために使用されるものは、同じくサファイアのファイバーである。その直径は150マイクロメートルのため、直径100mm のサファイア鏡の胴回りに巻きつけるようにして懸架することが可能である。もともと、医療用レーザーの導波路用に生産されているものであり、非常に折れやすい素材ではあるが、低温時における高い熱伝導率、ロスの低下、そして熱膨張率の大幅な低減という、熱雑音を下げる上で他に変わがたい特性を持つため使用している。機械工学系の先生が見たら呆れる懸架の仕方だが、風に吹かれる風鈴と違って、振動させてはいけなはずの鏡を吊るのだから、サファイアファイバーでも大目に見ていただきたい。

5. 熱雑音を目指して

CLIO の建設までの10余年、100mDelay-Line 型レーザー干渉計プロトタイプ (宇宙科学研究所)、20mFabry Perot 型レーザー干渉計プロトタイプ (国立天文台から東大宇宙線研へ移管)、TAMA300 (国立天文台) を通じ、レーザー干渉計の変位感度を向上させる努力は積み重ねられてきた。当然ながら、その目標感度を達成するために低減すべき雑音源の候補をできる限り考慮し、その低減処置をあらかじめ行っているのだが、実際 CLIO において、20Hz から 1 kHz 帯域で、自分たちにとって未踏の変位感度領域に突入すると、予想以上に大きな雑音源になっている物に気がつかず、苦しめられた雑音源が二つあるので、ここに紹介しよう。

一つは「音」である。ただし、まだ混入のメカニズムは理解されていない。重力波アンテナの光学系のうち、レーザーや Pund-Drever-Hall 法による鏡の位置検出を行うために必要な RF 周波数 (15.8MHz) によるレーザーへの位相変調を含む「入射光学系」と光の干渉を検出する「光検出系」以外の光学系はすべて真空中に格納されている。しかも、鏡の変位の情報は、光の干渉をホトディテクターで受け電気信号に変え、それを復調するまでは RF 領域にある。にもかかわらず、「光検出系」のみプラスチック板(後に気密で堅牢な金属タンク) で防音した結果、感度

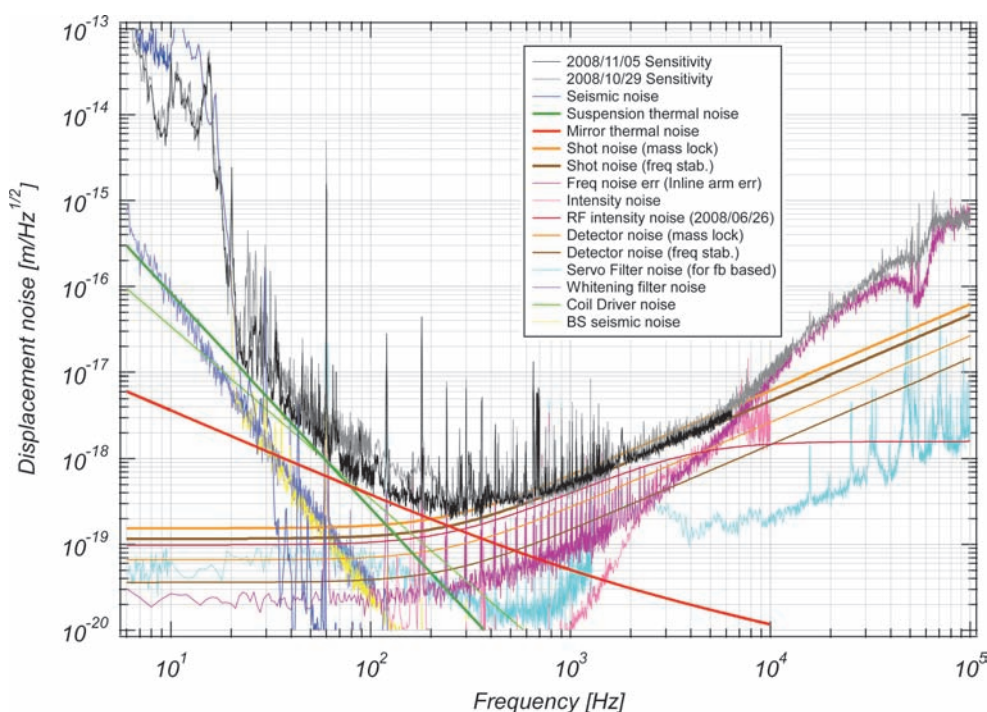


図 G : CLIO 感度曲線

が改善した。そもそも音というと、素人の私達は、定位点を通過する一過性のものと考えがちだ。しかし、恒常的に騒音を発する機器（PC、NIM 電源、計測機器など）が、コンクリートや金属構造に囲まれた閉実験室空間にある場合、音は定在波と捕らえるのが妥当だと後で知った。それが、光学常盤やその上に固定されている光学機器、真空タンクとその中に格納されている多くの光学機器を常にコヒーレントに叩き振動させているイメージであり、このあたりに解明の手がかりがあるかもしれない。

もう一つは、鏡の近くに不用意に配置した金属の発する熱雑音である。重力波アンテナ用の鏡には、その位置や姿勢を制御するために、細い円筒形のネオジウム磁石やサマリウムコバルト磁石を4本をつけ、それらに対峙するようにコイルが配置されている。その磁石の大きさ（つまり磁力）やコイルの巻き数は、コイルをドライブする電気回路の発する電流雑音が目標感度を犯さないという要請から、CLIO では、当初、直径2 mm 長さ10mm の円筒ネオジウム磁石がつけられていた。CLIO では、このコイルもクライオスタット内の低温部に設置される。このコイルに流れる電流による発熱を効率よく逃がす必要があるため、穴の開いたアルミを用意し、その穴の中にスタイキャストという熱伝導性の樹脂を使用しコイルを固めて作成していたのだが、このアルミ、および磁石の強さが仇となった。つまり、この穴あきアルミにも、電気回路では常識的に知られているジョンソンノイズが存在し、その電圧雑音が駆動する電流により逆に鏡を揺らすというメカニズムである。このことを指摘され、アルミ製コイルホルダーを排除交換したことで、20Hz から200Hz の間の感度はほぼ一様に3倍改善された。このおかげで、現在の CLIO の200Hz 付近の感度は、図 G のように、200Hz 付近で、サファイア鏡の熱雑音の一つである Thermo-elastic 雑音に肉薄し、それは、Standard Quantum Limit の約20倍のレベルである。

以上のように、常温感度の極限に行きついたとされている現在、鏡の低温化により熱雑音を低減させ、ベスト感度の更新を目指す努力を日夜重ねている状況である。

参考文献

- 1) “Doppler-Induced Dynamics of Fields in Fabry-Perot Cavities with Suspended Mirrors”, M. Rakhmanov, Appl. Opt. **40**, 1942-1949 (2001).
- 2) “Seismic vibrations mechanical filters for the gravitational waves detector VIRGO”, S.Braccini et. al., Rev. Sci. Instrum. **67**, 2899 (1996)
- 3) “Ultra-stable performance of an underground-based laser interferometer observatory for gravitational waves”, S.Sato et al., Phys. Rev. D **69**, 102005 (2004).
- 4) “Laser Interferometer in the KAMIOKA mine”, M.Ohashi et. al., Proceedings for 28 th International Cosmic Ray Conference, July 31-August 7, 2003. Trukuba, Japan. Under the auspices of the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP). Editors: T. Kajita, Y. Asaoka, A. Kawachi, Y. Matsubara and M. Sasaki, 3077-3080 (2003).
- 5) “Cryogenic cooling of a sapphire mirror-suspension for interferometric gravitational wave detectors”, T.Uchiyama et. al, PLA **242** 211-214 (1998).
- 6) “Mechanical quality factor of a cryogenic sapphire test mass for gravitational wave detection”, T.Uchiyama et. al, PLA **261** 5-11 (1999).
- 7) “Mechanical quality factor of a sapphire fiber at cryogenic temperature”, T.Uchiyama et. al, PLA Vol **273** 310-315 (2000).
- 8) Nobumasa Akamatsu, “Resonant antenna for continuous gravitational wave in the kHz region”, Doctor thesis, University of Tokyo, December 1990.
- 9) “Vibration-Free Pulse Tube Cryocooler System for Gravitational Wave Detectors II --- Colling Performance and Vibration”, Li et. al., Cryocoolers **13** 703-710 (2005).
- 10) “Vibration-free pulse tube cryocooler system for gravitational wave detectors I --- vibration-reduction method and measurement”, Tomaru et. al., Cryocoolers **13** 695-702 (2005).
- 11) “Cryogenic contamination speed of an ultra-low loss mirror for the cryogenic laser interferometer.”, S.Miyoki et al, Cryogenics **41** 415-420 (2001).
- 12) “Conduction Effect of Thermal Radiation in a Metal Shield Pipe in a Cryostat for a Cryogenic Interferometric Gravitational Wave Detector”, T.Tomaru et. al., JJAP **47** 1771-1774 (2008).
- 13) “Manufacture of a 10-km-scale radius-of-curvature surface by use of a thin-film coating technique”, S. Miyoki et. al., Optics Letters, **30** 1399-1401 (2005).
- 14) “重力波検出器用大口径ミラーの評価”. A.Ueda et. al., **27**, No.2, February, 116-120 (1999).
- 15) “Loss factors of mirrors for a gravitational wave detector”. S.Sato et. al., App. Opt. **38** 2880-22885 (1999)

人 事 異 動

発 令 日	氏 名	異 動 内 容	職
H21. 11. 1	大 石 奈緒子	在籍出向受入	特任助教

ICRR-Seminar 2009年度

9月18日(金) 手嶋政廣氏 (Max-Planck-Institut fuer Physik, Munich)

“Very High Energy Gamma Ray Astronomy with MAGIC telescopes”

10月9日(金) 高田昌広氏 (IPMU)

“ニュートリノ質量と宇宙論”

ICRR-Report 2009年度

ICRR-Report-551-2009-13 (October 5, 2009)

“Gravitational Wave Background and Non-Gaussianity as a Probe of the Curvaton Scenario”

Kazunori Nakayama and Jun'ichi Yokoyama

No.70

2009年11月1日

東京大学宇宙線研究所

〒277-8582 千葉県柏市柏の葉5-1-5
TEL (04) 7136-3143又は0578-85-9609 (神岡)
編集委員 佐々木真人 安部 航