



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/cat-icrr/>) からでも御覧になれます。

CONTENTS	
神岡低温重力波レーザー干渉計 CLIO による熱揺らぎ低減の実証.....内山 隆	1
2011年度宇宙線研究所修士博士研究法発表会の報告.....伊藤 英男	5
人事異動.....	7
ICRR-Seminar.....	8
ICRR-Report .....	8

**研究紹介**

**神岡低温重力波レーザー干渉計 CLIO による熱揺らぎ低減の実証**

内 山 隆  
【宇宙線研究所】

**はじめに**

独自に開発を進めてきた低温鏡技術を用いて、神岡低温重力波レーザー干渉計 CLIO (Cryogenic Laser Interferometer Observatory) の鏡の熱揺らぎ低減の実証に世界で初めて成功した [1]。2枚の単結晶サファイア製の鏡をそれぞれ17K、18Kに冷却することにより鏡の熱揺らぎを低減し、理論予測と一致する熱雑音低減による干渉計感度の向上を実現した。本研究成果で実証された低温鏡技術は、現在神岡にて建設中の大型低温重力波望遠鏡 KAGRA [2] にも実装され、年間複数回の重力波検出を可能にする感度の実現に寄与することが期待されている。

**鏡の熱雑音と低温鏡技術**

約200年前、ブラウン運動として有名な水面に浮かぶ微粒子の不規則な運動が発見された。その不規則な運動が、熱的に励起された分子の不規則な運動

による物だとアインシュタイン博士によって説明づけられたのが、奇跡の年といわれる1905年のことである。このような熱的に励起された不規則な運動を「熱揺らぎ (Thermal fluctuation)」、それによって生じる雑音を「熱雑音」と呼んでいる。非常に長い歴史的背景を持つ物理現象だが、現在に至っても様々な分野で原理的な限界として我々の前に立ちはだかっている。レーザー干渉計を用いた重力波検出器の場合には、鏡を懸架する振り子運動と鏡自身の弾性震動の熱揺らぎが、それぞれ「振り子の熱雑音」、「鏡の熱雑音」と呼ばれ原理的な雑音源となっている [3]。鏡の熱雑音は、基礎物理実験等で重要な役目をなう、固定キャビティを用いた周波数安定化レーザーにとっても原理的な雑音の一つであることが分かっており [4]、決して重力波検出のみの問題では無い。

鏡の熱雑音のメカニズムを理解するために、ある温度 ( $T$ [K]) の熱浴の中に置かれ熱平衡状態を保っている鏡を想像して欲しい。鏡自身に注目すると、熱浴から吸収するエネルギーにより弾性振動が常に励起されている。一般的に、この弾性振動は機械的な散逸 ( $\phi$ ) を伴っているが、散逸によって失われたエネルギーは熱に変わること、鏡面の振動に揺らぎをもたらす。この揺らぎは、重力波による効果と区別の出来ない光路長の変化を干渉計に与える。これが鏡の熱雑音である。鏡の熱雑音は、重力波レーザー干渉計の最重要な帯域である100Hz周辺の感度を制限する要因となっているため、その低減は重力波検出にとって極めて重大な課題である。

では、鏡の熱雑音を低減するにはどうすればよいだろうか。鏡の熱揺らぎの振幅の自乗  $\langle x^2 \rangle$  は、熱浴の温度  $T$  と鏡の持つ散逸  $\phi$  に対して、 $\langle x^2 \rangle \propto T\phi$  という依存性を持つことが揺動散逸定理 [5] によって導かれている。この関係式より、 $T\phi$  を小さくする、すなわち、「低散逸な鏡を低温に保つ」ことが鏡の熱揺らぎの低減、すなわち鏡の熱雑音の低減に直結することは明らかである。これが「低温鏡技術」の目指す物である。そして1997年度より、日本の重力波グループは、東大宇宙線研究所と高エネルギー加速器研究機構が中心となって、低温鏡技術の開発に着手した。この研究を極めて困難にしているポイントは、重力波干渉計を支配する他の雑音を増大させることなく、レーザー鏡を冷却しなければならない事である。

鏡を極低温に冷却し、熱雑音を下げた低温鏡のコンセプトは極めて妥当だと思われる。しかし研究開始当初に限っては、世界の重力波コミュニティーの中で、その実現性を疑う意見の方が多数を占めていた。それでも、我々はフィージビリティスタディに着手した。高出力レーザーに常時さらされる鏡をいかに冷却するかが最初の大きな課題となった。そして、単結晶サファイアの鏡を単結晶サファイアのファイバーで懸架し、そのファイバーの高い熱伝導を利用して鏡内部の熱を逃がし、鏡自身を20K以下に冷却する方法を提案した [6]。その後行われた冷却実証実験の良好な結果を受け、さらなる要素開発研究が推し進められる事となった。

多数の基礎研究の積み重ねによって、重力波コミュニティーの認識はすでに変化し、将来の先進的な重力波レーザー干渉計に低温鏡技術を導入することは当たり前になりつつある。これは、低温鏡が熱雑音だけでなく、熱レンズ効果 [7] や Parametric instability [8] といった問題に対しても有効な対策で

あることが分かってきたことも大きい。実際、日本の KAGRA 計画に続き、ヨーロッパの重力波グループは Einstein Telescope という、低温重力波レーザー干渉計を地下に設置する案をまとめている [9]。

以上のような背景のもと、積み上げてきた要素技術を実際の重力波レーザー干渉計に集約し、低温鏡技術の実証実験を行うべく CLIO の開発がスタートした。実験の目的を具体的に記せば、サファイア鏡を20K以下に冷却して鏡の熱揺らぎを低減し、結果として干渉計の鏡の熱雑音を低減による感度の向上を見ることである。感度の向上を見るため、2つの感度曲線が必要である。1つは室温の鏡の熱雑音で制限された感度曲線、もう一つは鏡を冷却し熱雑音を下げた感度曲線である。

## CLIO

CLIO は2012年現在においても世界で唯一の低温重力波レーザー干渉計である。CLIO の建設は2002年度より始まり、2006年2月18日に完成した。しかしながら、良好な感度の実現には更なる年月が必要であった。運用できることと感度が出ることの間、極めて大きなギャップが有るのが重力波レーザー干渉計である。CLIO の場合には、2006年度、2008年度は鏡を冷却せずに、2007年度、2009年度は鏡を冷却して感度向上実験を行った。そして2008年11月には、室温の鏡の熱雑音に感度が到達した。さらに2010年の3月に CLIO プロジェクトの目標である低温鏡技術の実証、すなわち、鏡の冷却による鏡の熱雑音の低減と、それによる感度の向上を見ることに成功したのである。KAGRA が最先端研究基盤事業に採択され、予算化されたのは、この実験結果を得たわずか3ヶ月後のことであった。CLIO 干渉計の構造、および、4年もの長期にわたったその感度向上実験の歴史に関しては、先に低温工学に掲載された解説記事 [10] に詳しく書かれているので参照して欲しい。

CLIO の設置された実験室は、神岡鉱山内に新規に掘削された「L」字型のトンネルである。CLIO は基線長100m の Fabry-Perot cavity (100m FP cavity) を両腕に持つレーザー干渉計で、波長1064nm、連続波出力2 W のレーザー光源を用いている。重力波のテストマスとなる100m FP cavity を構成する4枚の鏡は単結晶サファイアを基材に用いて製作されている。図1に CLIO で使用している鏡を示す。鏡は円柱状であり、その大きさは直径100mm、厚さ60mm、重さ約2 kg である。基材の端面にレーザー反射膜がコーティングされている。本記事の主題で

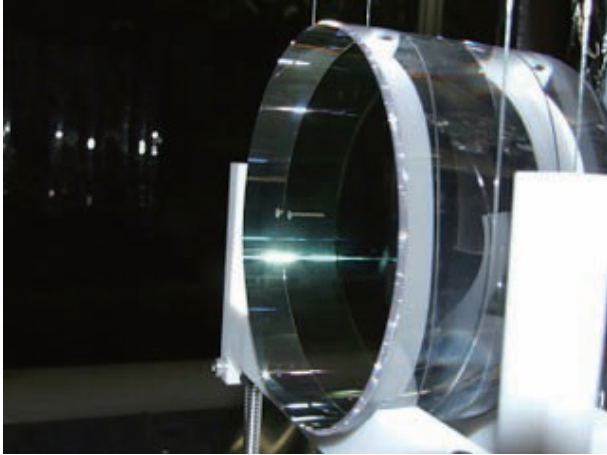


図1：CLIOで使用している単結晶サファイア鏡。

ある、鏡の冷却による熱揺らぎ低減の実証を目的とした測定においては、特に鏡の熱雑音の大きい2枚の鏡の冷却に集中し、目的を達成している。その2枚の鏡とは、各100m FP cavity のビームスプリッター側に懸架された鏡（フロント鏡）である。熱雑音の振幅は、鏡にあたるビームスポットが小さいほど、大きくなる。この性質により、フロント鏡は100m FP cavity を構成するもう一方の鏡よりも約2倍大きい振幅を持つことが理論的に予想されていた [1]。

鏡は6段構成の防振装置に懸架され、クライオスタット（低温真空容器）に内蔵される [11]。クライオスタット内部には、冷凍機によって約10K に冷却される輻射シールドがある。そのシールドに囲まれる、防振装置下部の3段が20K 以下に冷却可能である。鏡を冷却する際には、鏡から輻射シールドまでを熱伝導体で接続する必要がある。今回紹介する測定では、鏡を懸架するワイヤーの交換と、防振装置の重り同士の重りや、重りと輻射シールドをつなぐ熱伝導体（ヒートリンク）の追加を鏡を冷却する際に行った。鏡を懸架するワイヤーには、室温時には直径50ミクロンのアモルファス金属ワイヤー（商品名 Bol-fur）、鏡冷却時には高い熱伝導を持つ直径0.5mm の高純度（99.999%）アルミニウム線をそれぞれ用いた。また、ヒートリンクにも同じ高純度アルミニウム線を用いている。鏡の冷却には約250時間を要し、真空度は10-5Pa 台に到達した。

### 実験結果

図2（オリジナルは参考文献 [1] に掲載）に、CLIO で測定された2本の感度曲線を示す。感度曲線とは、鏡の変位量に換算された雑音のパワースペクトラム密度である。従って、縦方向に下へ行くほ

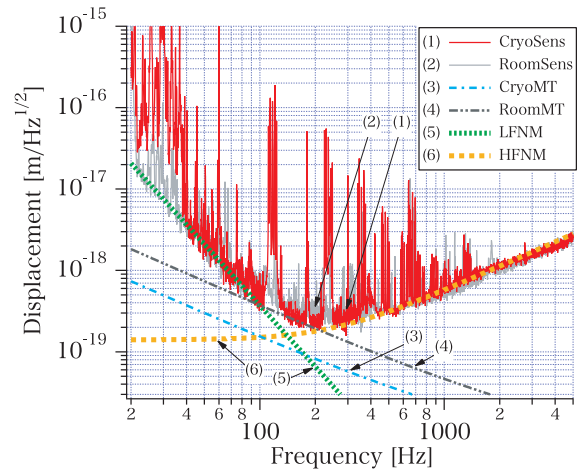


図2：CLIO 感度曲線。オリジナルは参考文献 [1] に掲載。CryoSens および RoomSens は、それぞれ、2010年3月20日、2008年11月5日に測定された。CryoSens の測定では2枚のフロント鏡をそれぞれ17K、18K に冷却して感度測定を行い、RoomSens の測定では、4枚全ての鏡が室温に置かれている。CryoMT と RoomMT は、CryoSens と RoomSens の測定にそれぞれ対応する鏡の熱雑音の予想曲線。LFNM と HFNM は、それぞれ CryoSens と RoomSens の低周波領域と高周波領域のノイズフロアーからフィッティングで求められた、ノイズフロアーモデル曲線である。

ど、雑音が下がり、感度が向上したことを意味する。図2に示す CryoSens および RoomSens は、それぞれ、2010年3月20日、2008年11月5日に測定された。CryoSens の測定では2枚のフロント鏡をそれぞれ17K、18K に冷却して感度測定を行い、RoomSens の測定では、4枚全ての鏡が室温に置かれている。感度曲線は、ノイズフロアーと多数のラインノイズの集合体である。ノイズフロアーに注目すると、90Hz から240Hz の範囲で、CryoSens のノイズフロアーが RoomSens のそれよりも下がり、感度が改善していることが分かる。例えば165Hz に注目すると、から  $3.1 \times 10^{-19} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$  から  $2.2 \times 10^{-19} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$  にノイズフロアーが下がっている。この感度の向上により、連星中性子星の合体によって発生する重力波の観測レンジも150kpc から160kpc に拡大した。鏡を冷却して、重力波に対する感度が実際に向上した初の例である。

鏡の冷却による感度の向上が、鏡の熱揺らぎの低減による事を示すため、ノイズフロアーのモデル化を行った。図2には、2本の感度曲線の他に、4本のプロットが示されている。4本のプロットの内、CryoMT と RoomMT は、CryoSens と RoomSens の各測定にそれぞれ対応する鏡の熱雑音の予想曲線である。鏡の熱雑音の計算においては、物性値や過去の測定値のみを用い、今回示している感度曲線に対

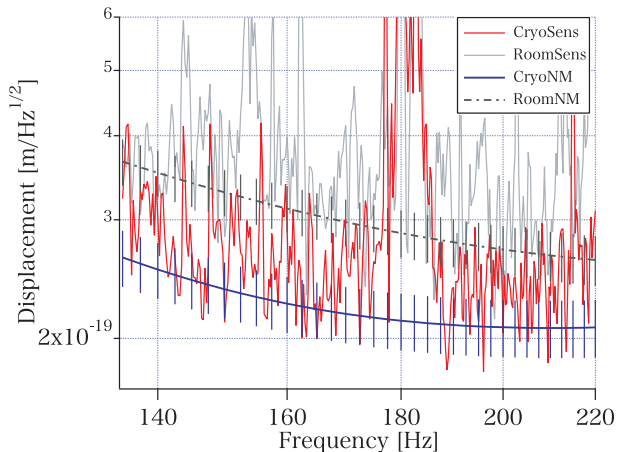


図3：測定された感度曲線 (CryoSens、RoomSens) とノイズフロアモデル (CryoNM、RoomNM) との比較。オリジナルは参考文献 [1] に掲載。CryoNM および RoomNM は、図2に示す LFNM、HFNM および鏡の熱雑音の予想曲線 (CryoMT あるいは RoomMT) の自乗和の平方根から作られた。

するフィッティングは一切行っていない。LFNM と HFNM は、それぞれ CryoSens と RoomSens の低周波領域と高周波領域のノイズフロアからフィッティングで求められたノイズフロアモデル曲線である。LFNM、HFNM および鏡の熱雑音の予想曲線 (CryoMT あるいは RoomMT) の自乗和の平方根をとる事により、CryoSens、RoomSens にそれぞれ対応する2つのノイズフロアモデル (CryoNM、RoomNM) を作る事が出来る。図3 (オリジナルは参考文献 [1] に掲載) に測定された感度曲線 (CryoSens、RoomSens) とノイズフロアモデル (CryoNM、RoomNM) の比較を示す。ノイズフロアモデルにはエラーバーも付けられている。

図3より、RoomSens のノイズフロアはエラーバーの範囲で RoomNM と一致している。このことから、RoomSens は室温の鏡の熱雑音 (RoomMT) によって制限されていることが分かる。その一方で、CryoSens のノイズフロアは RoomNM よりも下に有り、かつ CryoNM とエラーバーの範囲で一致している。CryoNM と RoomNM との差が鏡の熱雑音の大きさだけであることに注目すると、以下の結論を導くことが出来る。CryoSens と RoomSens との比較で見られる雑音の低減は、RoomSens を制限していた鏡の熱雑音の改善による物である。この熱雑音の改善は、2枚の鏡の冷却による鏡の熱揺らぎの低減によって成された。今回 CLIO によって示された、鏡の冷却による鏡の熱揺らぎ低減の実証は、世界初の成果である。

## おわりに

低温鏡技術は鏡を極低温に冷却し、その熱揺らぎを低減する技術である。今回 CLIO を用いた実証実験の成功は、長く続けられてきた低温鏡技術開発にとって重要な節目となった。この成果は、重力波レーザー干渉計の発展に大きく寄与することは当然として、同じく鏡の熱揺らぎで性能が制限されている周波数安定化レーザーの改善にも繋がる可能性を秘めている。

現在、低温鏡技術を導入した重力波レーザー干渉計 KAGRA が、神岡に建設中である。KAGRA の鏡の熱雑音は室温において  $4 \times 10^{-20} \text{m}/\sqrt{\text{Hz}} \times (100\text{Hz}/f)$  と予測されているが、4枚全ての鏡を20Kに冷却する事で、約一桁小さい  $5 \times 10^{-21} \text{m}/\sqrt{\text{Hz}} \times (100\text{Hz}/f)^{1/2}$  に低減できると考えている。この鏡の冷却によって得られる低熱雑音を活かし、KAGRA では年間複数回の重力波検出が可能な感度が実現できると考えている。その早期実現を目指して、一層の努力を続けていきたい。

## 参考文献

- [1] T. Uchiyama, et al., "Reduction of thermal fluctuations in a cryogenic laser interferometric gravitational wave detector," *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 141101 (5pp)
- [2] K. Kuroda, et al., "Status of LCGT," *Class. Quantum Grav.* **27** (2010) 084004 (8pp)
- [3] P. R. Saulson, "Thermal noise in mechanical experiments," *Phys. Rev. D* **42** (1990) 2437-2445
- [4] K. Numata, et al., "Thermal-noise limit in the frequency stabilization of lasers with rigid cavities," *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 250602 (4pp)
- [5] H. B. Callen and T. A. Welton, "Irreversibility and Generalized Noise," *Phys. Rev.* **83** (1951) 34-40
- [6] T. Uchiyama, et al., "Cryogenic cooling of a sapphire mirror-suspension for interferometric gravitational wave detectors," *Phys. Lett. A* **242** (1998) 211-214
- [7] T. Tomaru, et al., "Thermal lensing in a cryogenic sapphire substrates," *Class. Quantum Grav.* **19** (2002) 2045-2049
- [8] K. Yamamoto, et al., "Parametric instabilities in the LCGT arm cavity," *Journal of Physics: Conference Series* **122** (2008) 012015 (6pp)
- [9] M. Punturo, et al., "The third generation of gravitational wave observatories and their science reach,"

Class. Quantum Grav. **27** (2010) 084007 (23pp)  
 [10] T. Uchiyama and S. Miyoki, "Experimental Demonstration of Cryogenic Mirror Technique-Achievements of CLIO-," J. Cryo. Super. Soc. Jpn., **46**

(2011) 392-399.

[11] T. Uchiyama, et al., "Cryogenic systems of the Cryogenic Laser Interferometer Observatory," J. Phys.: Conf. Ser. **32** (2006) 259-264

## 報告

# 2011年度宇宙線研究所修士博士研究発表会の報告

伊藤 英男

【宇宙線研究所】

2012年2月28日、宇宙線研究所6階大セミナー室において、修士博士研究発表会が行われました。この研究発表会は、宇宙線研で研究する大学院生が相互にその研究を発表、討議することで研究の視野を広げるとともに、親交を深めようという目的で開催されました。また、この発表会では優れた研究に対し、所長賞を授与されました。

研究会は11名の学生の発表に加えて、13名によるポスターセッションで構成されました。

会場には開始時間から多数の方が聴講するために席についており、初めての企画としてはその時点で大成功となる様相を呈していたと思います。発表そのものに関して特に印象に残ったことは、発表者全員が総じて、きちんと自らがやっている研究の背景を分かり易く説明していたことでした。このような異分野間の研究者が集まる場での発表は、物理学会を除けばそれほど多いものではありません。そのような場で必要な発表スキルを身につけ、適切に実践していたのは、さすがと言う他ありません。また、発表後の質疑応答時間も、参加者から積極的に質問が出ており、それに対して応える発表者側も丁寧にかつ正確に受け答えをしたことも印象に残りました。

セッションとセッションの合間には、ポスターセッションが行われたのですが、こちらもかなり盛況で、各所でポスターに書かれた内容に関する質問が飛び交っていました。もちろん、ティータイムも兼ねていたので、そこで新たな親交も生まれており、今後その結び付きから新たな共同研究が生まれてくるかもしれないことを思うと、胸が熱くなる想いでした。

発表会終了後は、懇親会として会場となった6階大セミナー室にて、慎ましやかながらもパーティーが開かれました。参加者同士が新たに打ち解けあいながら、物理の話や趣味の話などに興じておりました。



図1：発表会での発表の様子

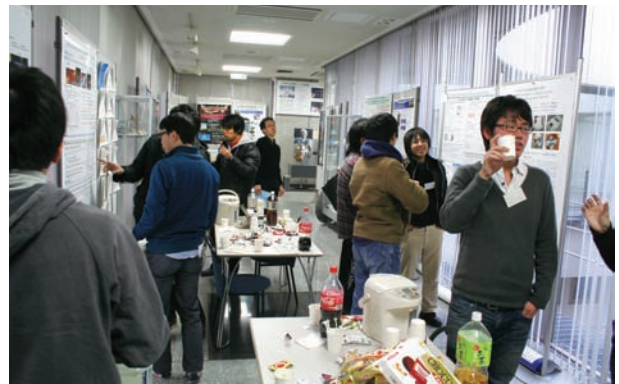


図2：ポスターセッションの様子



図3：総評を述べている中畑教授



図4：所長賞を受賞した直後の関口さんと梶田所長



図5：授与式後の全体写真

その懇親会の締め括りに、今回の発表会で最も素晴らしい発表を行っていた学生への所長賞授与式が行われました。第一回宇宙線研究所修士博士研究発表会所長賞を授与された栄えある学生は…

重力波グループ所属 関口貴令さん

が選ばれました！おめでとうございます！今回の発表会は、私から見ても非常に甲乙つけ難いくらいレベルが高い発表だっただけに、この所長賞を授与されたというのは、今後の研究において非常に大きな励みになるのではないかと思います。所長賞を授与



図6：当日までに完成が間に合わなかった所長賞のトロフィー。後日関口さんに手渡された

された関口さんだけではなく、惜しくも所長賞を逃してしまった発表者の皆さん、そしてポスターセッションで発表された皆さんも含めて、これから先が非常に楽しみな学生ばかりでした。見守りつつも普段から叱咤激励を与えているスタッフの皆さん、そして発表者と同分野で他機関所属のスタッフの皆さん、時には厳しく、時には支えて頂ければ、彼らは今後もそれを糧にして成長していけるはずですので、これを読んでいるスタッフの皆様、どうぞよろしくお祈りします。

#### 【編集後記】

発表会の記事を書くにあたり、どのように締めるのか迷いつつ書いてしまい、終いにはあまり締まらない感じの記事になってしまったような気もしますが、現場を見ていた私には非常に強く学生の研究への熱意が伝わってきました。宇宙線研ではこの修士博士研究発表会を、毎年定期的に行う予定ですので、今後ともよろしくお祈り致します。また、今年度の発表会には是非脚をお運び頂き、質疑等で場を盛り上げ、叱咤激励して頂ければと思います。

## 人 事 異 動

発令日	氏名	異動内容	職
H24. 3. 31	福来正孝	定年退職	教授
H24. 3. 31	山本邦之	再雇用満了	技術職員
H24. 3. 31	中山祥英	任期満了	特任助教
H24. 3. 31	黒柳幸子	任期満了	特任研究員
H24. 3. 31	池田大輔	任期満了	特任研究員
H24. 3. 31	多米田裕一郎	任期満了	特任研究員
H24. 3. 31	西村康宏	任期満了	特任研究員
H24. 3. 31	井上進	任期満了	特任研究員
H24. 3. 31	梶裕志	任期満了	特任研究員
H24. 3. 31	LAING Andrew Brian	任期満了	特任研究員
H24. 3. 31	福井美沙	任期満了	事務補佐員
H24. 3. 31	森元祐介	任期満了	技術補佐員
H24. 3. 31	池羽希理子	任期満了	技術補佐員
H24. 3. 31	増田正孝	任期満了	技術補佐員
H24. 3. 31	日下部元彦	受入終了	学振特別研究員
H24. 3. 31	川田和正	受入終了	学振特別研究員
H24. 4. 1	小野宜昭	新規採用	助教
H24. 4. 1	川田和正	新規採用	特任助教
H24. 4. 1	西村康宏	新規採用	特任助教
H24. 4. 1	百瀬莉恵子	新規採用	特任研究員
H24. 4. 1	池田大輔	再採用	特任研究員
H24. 4. 1	木坂将大	新規採用	特任研究員
H24. 4. 1	齊藤浩二	新規採用	特任研究員
H24. 4. 1	多米田裕一郎	再採用	特任研究員
H24. 4. 1	木戸英治	新規採用	特任研究員
H24. 4. 1	岡崎奈緒	新規採用	技術職員
H24. 4. 1	牛丸司	配置換	技術職員
H24. 4. 1	横山修一郎	新規受入	学振特別研究員
H24. 4. 1	赤池陽水	新規受入	学振特別研究員
H24. 4. 1	瀬戸美香子	転出	総合企画部へ
H24. 4. 1	金子沙穂	転出	医学部附属病院へ
H24. 4. 1	越智将	転入	総務係へ
H24. 4. 1	森坪繁	転入	予算・決算係へ
H24. 4. 16	DE ANGELIS Alessandro	新規採用	特任教授
H24. 4. 16	MOTZ Holger Martin	新規採用	特任研究員
H24. 4. 30	陳鼎	辞職	特任研究員
H24. 5. 1	WENDELL Roger Alexandre	新規採用	助教
H24. 5. 1	中山祥英	新規採用	特任助教
H24. 5. 1	YUMA Suraphong	新規採用	特任研究員
H24. 5. 31	DE ANGELIS Alessandro	任期満了	特任教授
H24. 5. 31	武長祐美子	任期満了	特任研究員
H24. 6. 1	Athar, Mohammad Sajjad	新規採用	特任准教授
H24. 6. 1	田中秀和	新規採用	特任助教

## ICRR-Seminar 2011年度

2012年 3月28日(水) 福来正孝 (宇宙線研究所)  
 “素粒子研究より天體物理学へー数多の人々との  
 出合いで受けた刺激”

## ICRR-Seminar 2012年度

2012年 6月26日(火) 伊藤洋介 (東京大学ビッグバ  
 ン宇宙国際研究センター)  
 “重力波の重力レンズ効果”  
 2012年 6月14日(木) 百瀬 莉恵子 (宇宙線研究所)  
 “近傍銀河における構造と星形成則”  
 2012年 5月30日(水) Naba Mondal (Tata Institute of  
 Fundamental Research)  
 “India-Based neutrino Observatory (INO) Project”  
 2012年 5月22日(火) Alessandro De Angelis (Udine  
 University)  
 “Gamma Ray Astronomy and Fundamental Physics”

## ICRR-Report 2011年度

ICRR-Report-610-2011-27  
 “Weak lensing generated by vector  
 perturbations and detectability of cosmic strings”  
 Daisuke Yamauchi, Toshiya Namikawa, and  
 Atsushi Taruya.  
 ICRR-Report-611-2011-28  
 “Axino dark matter and baryon number  
 asymmetry from Q-ball decay in gauge mediation”  
 Shinta Kasuya, Etsuko Kawakami, and Masahiro  
 Kawasaki.  
 ICRR-Report-612-2011-29  
 “Void bias from primordial non-Gaussianities”  
 Toyokazu Sekiguchi, and Shuichiro Yokoyama.  
 ICRR-Report-613-2012-30  
 “A 125GeV Higgs Boson Mass and Gravitino  
 Dark Matter in R-invariant Direct Gauge  
 Mediation”  
 Masahiro Ibe, and Ryosuke Sato.  
 ICRR-Report-614-2012-31  
 “The Lightest Higgs Boson Mass in MSSM with  
 Strongly Interacting Spectators”  
 Jason L. Evans, Masahiro Ibe, and Tsutomu T.  
 Yanagida.  
 ICRR-Report-615-2012-32  
 “Seesaw Mechanism with Occam’s Razor”  
 Keisuke Harigaya, Masahiro Ibe, and Tsutomu  
 T. Yanagida.

No.81

2012年6月30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04-7136-5148  
 編集委員 伊藤英男