



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

平成23年度にあたって.....	梶田 隆章	1
暗黒物質の直接探索を目指した XMASS 実験.....	岸本 康宏	2
重力波推進室の発足.....	黒田 和明	9
人事異動.....		13
ICRR-Seminar.....		13
ICRR-Report.....		14

研究紹介

平成23年度にあたって

梶 田 隆 章

【東京大学宇宙線研究所】

3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では多くの方々の尊い命が失われました。亡くなられた方々に深い哀悼の意を表します。それとともに現在でも被災地で不自由な暮らしを余儀なくされている方々が、少しでも早く通常の生活を取り戻しますよう心から願っています。

平成23年度は、地震とその後の原子力発電所事故、更にはこの事故も大きく影響した電力不足という状況で始まりました。まず、宇宙線研究所の被災状況とその後の対応について述べさせていただきます。幸いにも、宇宙線研究所の被害は少なく、大きなダメージは6階の図書室の本がほとんど落下してしまったことくらいだと思います。図書室の本については、川崎先生を中心に大学院学生や研究員の皆様をはじめ多くの方のボランティアによって復活できました。皆様のご厚意に深く感謝します。それにし

ても、法人化以降の大学の安全対策の強化がなされていたことで、今回の大地震において研究室の書棚が倒れるなどによる大きな被害は出ませんでした。皆様には今後もより一層の安全対策をお願いしたいと思います。

地震の影響により電力不足が深刻で、東京大学では前年比ピークで30%の電力カットを目標に節電を進めることにしています。残念ながら、電力の約3分の2を共同利用計算機で使っている宇宙線研では、30%の電力カットはいわゆる節電だけでは達成が不可能です。そのため現在共同利用計算機の一部と計算機室のエアコンの一部を停止させていただいています。今年夏は宇宙線国際会議があるなどの理由で計算機の使用希望が高いと思います。このようななか、計算機の部分停止は誠に申し訳ありませんが、もう少しの間ご辛抱をください。

さて、昨年夏に開始された大型低温重力波望遠鏡の建設は、今後建設が本格化します。このようななか重力波望遠鏡の建設を着実に推進するために、本年4月1日より重力波推進室を立ち上げました。今後はこの組織が重力波望遠鏡の建設を主導していくことになります。今まで以上の皆様のご支援をよろしくお願いいたします。

地震の影響はあるものの、今年はいろいろな研究成果の報告が期待されます。この原稿を書くのが遅れたのでここで触れることができるのですが、既に東海村の大強度陽子加速器 J-PARC とスーパーカミオカンデ間の長基線ニュートリノ振動実験 T2K では、未発見であった第3のニュートリノ振動の結果現れた電子ニュートリノ事象の兆候を報告しました。残念ながら地震の影響で現在は加速器が停止していますが、一刻も早く復帰をして、よりよい結果が得られることを願っています。また、最高エネルギー宇宙線の TA 実験は2008年以来観測を進めてお

り、いろいろな成果を出すべき時で、その成果を世界が注目しています。また、昨年始まったダークマター探索の XMASS 実験の結果も大いに期待されます。その一方で、TeV 宇宙ガンマ線の研究分野で世界のパイオニア的存在として活躍してきたオーストラリアのカンガルー実験は今年度いっぱい終了することになりました。

長らく研究所の将来計画の中心でありました重力波の計画が走り出したことや、一時代を築いたガンマ線の研究が終了することなどを受け、今後の宇宙線研究所の長期的な研究計画を議論すべき時が来たと感じています。広く皆様のお考えを聞いて今後の宇宙線研究所の研究の方向性を考えるときかと思います。

このように平成23年度は今までも増して重要な年度となると思います。皆様の宇宙線研究所に対する更なるご支援をよろしくお願いいたします。

研究紹介

暗黒物質の直接探索を目指した XMASS 実験

岸 本 康 宏

【東京大学宇宙線研究所】

はじめに

始めまして、岸本康宏です。昨年12月に宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設に赴任しました。神岡施設では、スーパーカミオカンデ実験、T2K 実験、XMASS 実験等多くの実験が行われていますが、本稿では、私が主に参加している、XMASS 実験の現状について詳しく紹介します。

暗黒物質

私が暗黒物質の研究に初めて触れたのは大学院の時代のことで、私にとって最初の研究のテーマであった。しかし、暗黒物質が指摘されたのは、それよりもずっと古く、1933年の F. Zwicky まで遡る。彼はかみの毛座銀河団の赤方偏移を測定し、「目に見える物質」だけでは銀河団が平衡状態にあることは難しく、重力と相互作用するが「目には見えない」物質の必要性を示した。これが今日「暗黒物質」と呼ばれるものである。

この Zwicky の研究以後、暗黒物質は、あらゆる

波長の光子（ガンマ線、X 線、可視光、赤外線、電波）によって調べられたにも関わらず未だ観測されておらず、その存在が重力相互作用を通じてのみ確認されている。近年の暗黒物質についての研究の進捗は特に著しく、例えば、WMAP 衛星による宇宙背景マイクロは観測によると、非バリオンの暗黒物質は宇宙の質量の約23%を占めていることが分かった（図1）。これに対し、通常の物質は約4%と見積もられていることから、宇宙の物質の大半は暗黒物質であると考えられている。更に、重力レンズ効果を通じて、暗黒物質の空間的な分布までも測定されている（図2）。この様に暗黒物質が存在することは間違いのない事実となった。すると次に問題となるのは、暗黒物質の正体は何かということである。しかし、現在のところ、暗黒物質の正体については全く不明のままである。

暗黒物質の正体は何か？この問いに答えようとする時、当然考えるべき候補は、現在までに発見されている物質である。過去に、ニュートリノと褐色矮星等の暗い天体（MAssive Compact Object, MACHO）

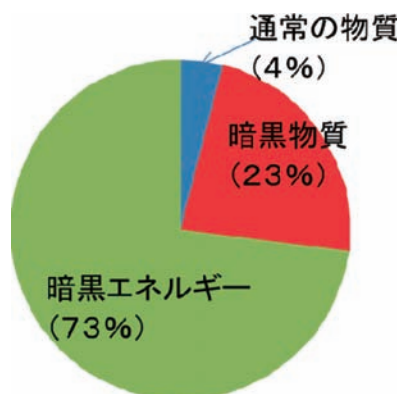


図1：宇宙の組成

この宇宙の通常物質はわずか4%しかなく、暗黒物質が23%を占める。残りの73%は暗黒エネルギーと呼ばれる、宇宙膨張を加速する斥力のエネルギー。

が候補として研究されたが、いずれも暗黒物質ではないことが判明した。ニュートリノは質量が1～10eV程度であるなら暗黒物質として存在する可能性があったのだが、トリチウムのベータ崩壊反応を用いたニュートリノ質量の直接測定や、大気ニュートリノ観測によるニュートリノの質量二乗差 (Δm^2) による間接的制限から、ニュートリノが暗黒物質の主要な成分とはなり得ない。MACHOsの実験結果は、マゼラン大星雲の星1つ1つを観測し、我々の銀河内のMACHOsによって重力レンズ効果で光度を変える現象を数えたもので、やはりMACHOsで暗黒物質を説明することが出来ないことを示した。このMACHOs実験は、私が修士学生(1997年)の時にしたもので、我々の銀河の暗黒物質が非バリオンであることを示した点と、重力レンズ効果を暗黒

物質の探索に始めて用いてその威力を示した点で、特に私の印象に残っている。

暗黒物質の正体は未だ分からないままであるが、最近の観測事実から、その性質の詳細が調べられている。宇宙の構造進化のシミュレーションによると、宇宙の泡構造を良く説明するためには、暗黒物質が「冷たい」必要がある。ここでいう「冷たい」とは、非相対論的な速度で運動していることを言う。また暗黒物質は電磁波で観測されず、なおかつ現在の宇宙に存在するのであるから、電荷を持たず安定であることも要請されている。このような性質をもった暗黒物質をこれまでに発見されている物質によって説明することは困難であるので、これまでに発見されていないエキゾチックな物質が暗黒物質の候補として真剣に研究されている。その様なエキゾチックな暗黒物質の候補の代表格が「Weekly Interacting Massive Particles (WIMPs)」と呼ばれる素粒子である。

WIMPsが暗黒物質の最有力候補として考えられている理由は、WIMPsの具体的な例が素粒子物理学の理論的な研究から提案されていることにある。現在の素粒子理論には幾つもの問題点があり、それを解決するとして超対称性理論が提案されている。超対称性理論は、この宇宙の4つの力、つまり「強い力」「弱い力」「電磁気力」そして「重力」の内、重力を除いた他の3つの力の統一を目指した理論の1つで、その枠組によると、WIMPsの性質をもった素粒子(ニュートラリーノ)が予言されている。ニュートラリーノは超対称性粒子の重ね合わせから成る粒子で、超対称性粒子の中で最も小さい質量(陽

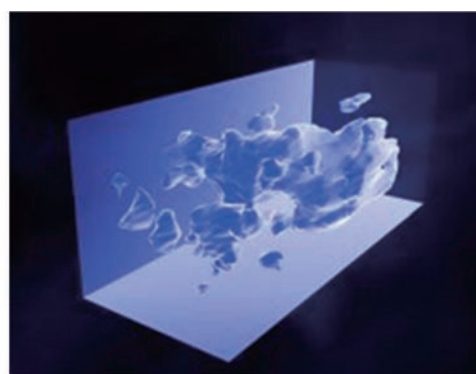


図2：重力レンズ効果によって得られた暗黒物質の空間分布

左の写真は、2つの銀河団が衝突した直後を撮影したもので、赤い部分はX線によって撮影された高温のガスの存在を示す領域。一方の青の領域は重力レンズ効果で撮影された銀河の分布。銀河団同士の衝突の際、電磁相互作用する通常ガスはぶつかり合い、容易に通抜けことが出来ないが、暗黒物質は容易に通過する。そのため、通常物質と暗黒物質が分離して見えている。

右の写真は、ハッブル宇宙望遠鏡を用いて重力レンズ効果によって暗黒物質の分布を調べたもの(宇宙進化サーベイ(COSMOS)プロジェクト)。左手前が近傍宇宙で一番奥が約80億光年の距離に相当する。

子の100～1000倍程度)を持った安定な素粒子である。超対称性理論には分かっていないパラメータが数多くあるため、ニュートラリーノと物質の反応断面積が分かっていないが、逆の観点から見れば、暗黒物質ニュートラリーノを検出することによって、超対称性理論を証明し、さらにその理論の詳細を調べることが可能であると言える。従って、暗黒物質の研究は、天文学のみならず、素粒子物理学にとっても非常に興味ある研究テーマとなっている。

太陽系内での暗黒物質の局所的な密度は約 $0.3\text{GeV}/c^2/\text{cm}^3$ と見積もられている。WIMPs の質量を $100\text{GeV}/c^2$ と仮定すると 1ℓあたり 3 個の WIMPs が我々の周囲を飛び回っているのである。しかし、WIMPs と通常の物質との相互作用は非常に稀にしか起こらない。素粒子の標準模型に最小限の拡張を加え、 10^{16}GeV で力が統一する超対称性理論 (Constraint MSSM) に基づいて計算すると、通常の物質との相互作用の事象頻度は、 $10^{-1} \sim 10^{-5}\text{event/kg/day}$ と非常に少ない。核子との散乱断面積にして $10^{-42} \sim 10^{-46}\text{cm}^2$ である。

WIMPs と核子との散乱断面積が小さいばかりでなく、WIMPs は「冷たく」、光速の約1000分の1と見積もられているため、散乱事象のエネルギーも10keV程度と小さい。図3にWIMPs が典型的な原子と弾性散乱した場合の反跳エネルギースペクトル

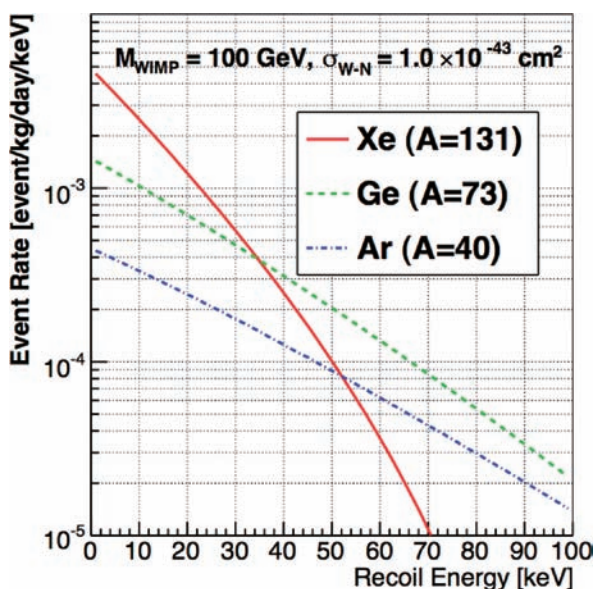


図3：WIMPsの反跳エネルギースペクトル

WIMPsの質量が 100GeV 、散乱断面積を 10^{-43}cm^2 と仮定した場合の反跳エネルギースペクトル。赤の実線、緑の点線、青の一点鎖線は、それぞれ、標的物質がXe、Ge、Arの場合を示す。検出器の閾値を充分下げることが出来れば、キセノンの様に質量数の大きい物質が有効であることが分かる。

を示す。ここではWIMPsの質量を $100\text{GeV}/c^2$ 、WIMPsの散乱断面積を 10^{-43}cm^2 と仮定した。図から分かるように、WIMPsの信号は連続スペクトルで、低エネルギー側事象数が多い。このWIMPsの信号を捉えるためには、稀な現象がバックグラウンドの中に埋没してしまうことの無い様に、徹底した低バックグラウンド化と低閾値化が極めて重要であることが分かる。

XMASS 実験

XMASS(エックスマス) 実験は、暗黒物質直接探索をはじめ、低エネルギー太陽ニュートリノ観測、二重ベータ崩壊探索を掲げた多目的の実験である。XMASS 実験は多目的実験であるため、その名は以下の3つに由来している。

- Xenon detector for weakly interacting MASSive Particles (暗黒物質探索)
- Xenon MASSive detector for solar neutrino (pp/ ^7Be 太陽ニュートリノ観測)
- Xenon neutrino MASS detector(二重ベータ崩壊実験)

XMASS 実験は、希ガス液体シンチレータである液体キセノンを検出媒体とし、神岡鉱山の地下1,000メートルに設置して、極低放射性バックグラウンド環境下で、非常に稀な事象を観測することを目標としている。XMASS 実験の計画は、図に示したように、大きく三段階に分かれる(図4)。800kgのキセノンを用い、有効体積100kgにより暗黒物質探索のための検出器(XMASS-I)は、まさに装置の建設が終了しており、運転を開始したところである。この検出器で暗黒物質を捉え、そして将来にむけて、暗黒物質の詳細を高統計で調べるXMASS-1.5、更には太陽ニュートリノ検出など、多目的で究極の低バックグラウンド検出器XMASS-IIが計画されている。

キセノンは原子番号54の希ガスで、常温ではガスの状態であるが、約 -100°C まで冷却すると密度 $3\text{g}/\text{cm}^3$ の液体となる。この液体キセノンは、各種放射線と相互作用すると蛍光を発しシンチレータとして機能する。液体キセノンは発光量が多く、高感度の光電子増倍管と組み合わせることで低閾値の装置を構築することが出来る。また密度が高いため、1トンクラス的大型検出器をコンパクトに作成することが可能である。更に、キセノンの温度と圧力を制御することにより、容易に気相と液相の間を相転移するので、これを利用して、キセノン自身を高純度に純化すること出来る。このことは、暗黒物質探

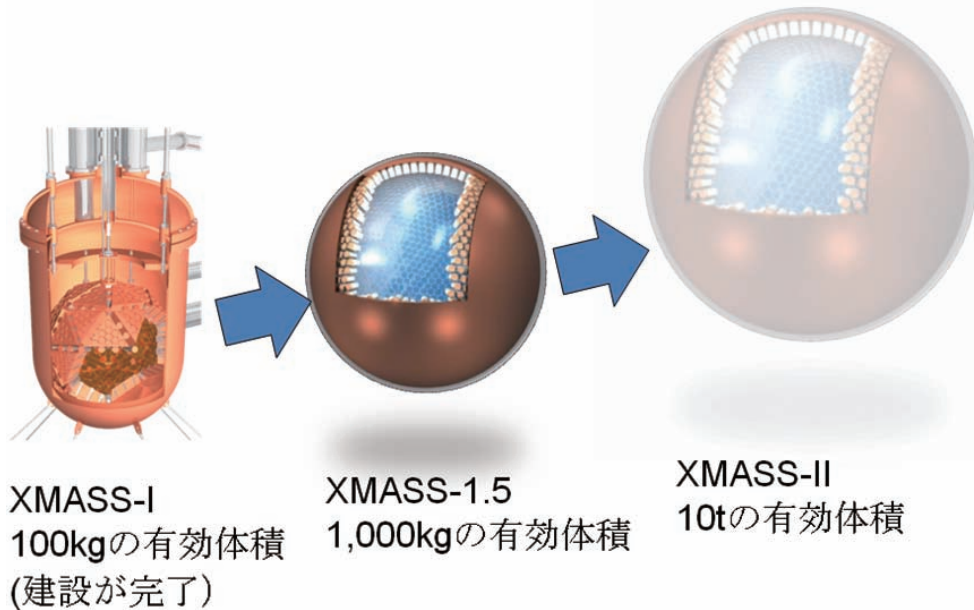


図4：XMASS 実験計画

現在、800kgのキセノンを使用し、有効体積100kgを有するXMASS-I建設が完了し、暗黒物質探索に向けて、装置の性能評価、バックグラウンドの理解を進めているところである。このXMASS-Iで暗黒物質を発見した後、その詳細を季節変動やスペクトルを通じて調べ上げるために、有効体積を10倍の1,000kg(キセノン総量では5,000kg)のXMASS-1.5を計画している。更に暗黒物質の詳細研究以外にも、pp太陽ニュートリノ、二重ベータ崩壊実験などをも視野にいたれた、XMASS-II(有効体積10t)が考えられている。

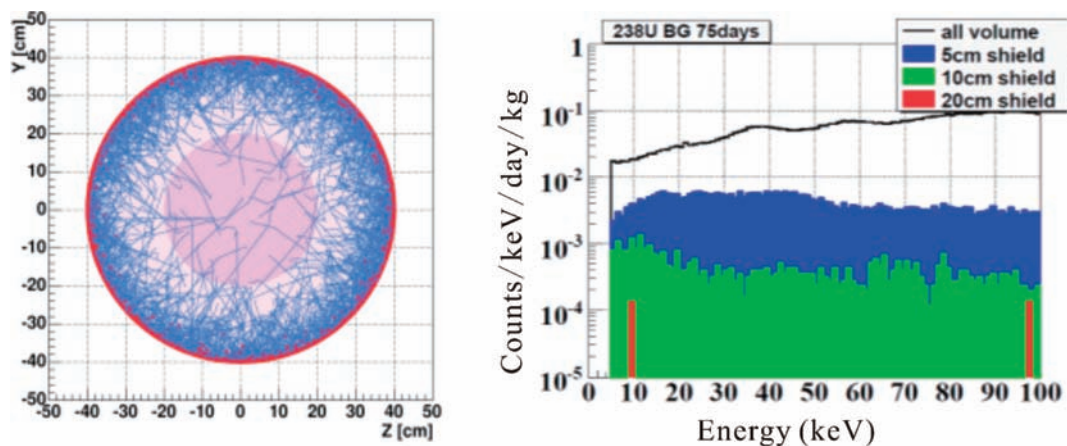


図5：液体キセノンの自己遮蔽の効果を示す Monte Carlo シミュレーション

XMASS 検出器の光電子増倍管のある位置でガンマ線を放出させ、そのガンマ線がどの程度XMASS 検出器の内部にまで到達するかをシミュレーションしたもの。ガンマ線としてはウラン系列で永年平衡が成立している場合が仮定されている。左がガンマ線の飛跡をトラックしたもの。赤色でハッチをかけた半径20cmの領域には僅かな数のガンマ線しか到達していない。右の図はエネルギースペクトルである。キセノンによる自己遮蔽の厚みが5 cm(青)、10cm(緑)、20cm(赤)と厚みを増すにつれ、ガンマ線が吸収され、検出器内部へ届かないことが分かる。

素実験に不可欠な低バックグラウンド化という観点から非常に大きなメリットである。

低バックグラウンド化という点で、XMASS 実験の際立った特徴は、液体キセノンによる「自己遮蔽」である。通常の装置の場合、外部からの放射性バック

グラウンドに対して、ガンマ線を遮蔽する鉛や高純度の銅、高速中性子に有効なポリエチレンや水を利用する。しかし、WIMPs 探索の要求は非常に高く、最新の注意を払って材料を吟味したとしても、そもそも検出器の素材に含まれるウラン、トリウム等の

天然放射性物質だけで限界に達してしまう。しかし、XMASS 実験では、外部からのガンマ線は、高度に純化された高密度 ($\rho \sim 3 \text{ g/cm}^3$) で原子番号の大きい ($Z=54$) キセノンによって吸収されるので、WIMPs 探索のエネルギー領域に相当する 100keV 以下ではバックグラウンドを大幅に削減することが可能である (図 5)。

研究の現状

800kgの液体キセノンを用いた暗黒物質探索用の XMASS 実験装置は、2007年に神岡鉱山内に実験ホールが完成して以降、共同研究者一丸となって急ピッチで建設がすすめられてきた。大きな節目となるものだけ挙げると、以下ようになる。

- 水シールド用の外水槽を設置 (2009年始め)
- 光電子増倍管を取り付けるホルダーの組み立てに着手 (2009年12月) (図 6)
- 全ての光電子増倍管の取り付け完了 (2010年 2月)
- 液体キセノンが格納される断熱真空容器が完成 (2010年 8月)

- 外部真空容器が設置され、検出器本体部分の建設が終了 (2010年 9月)
- キセノンガスを蒸留により純化し、キセノンを装置に導入 (2010年 9月)
- 試運転開始 (2010年10月)

私は、この建設作業の後 (2010年12月) に宇宙線研究所に着任したので、この建設作業に携わることが出来なかった。建設当時を知る人からは「何をのんきな」とお叱りを受けるかもしれないが、私としては大変残念に思う。

現在、XMASS 装置は安定して運転を続けながら、装置の性能評価とバックグラウンドについての詳細を調べている最中である。これらの内容は非常に多岐に亘り、また相互に関連があるものの多いので、1つ1つの内容を迅速かつ丹念に精査する必要がある。その内の幾つかについて紹介する。

エネルギーと事象位置の再構成

XMASS 実験装置の上部から各種ガンマ線源を銅製のロッドの先端に取り付けて導入し、そのデータ

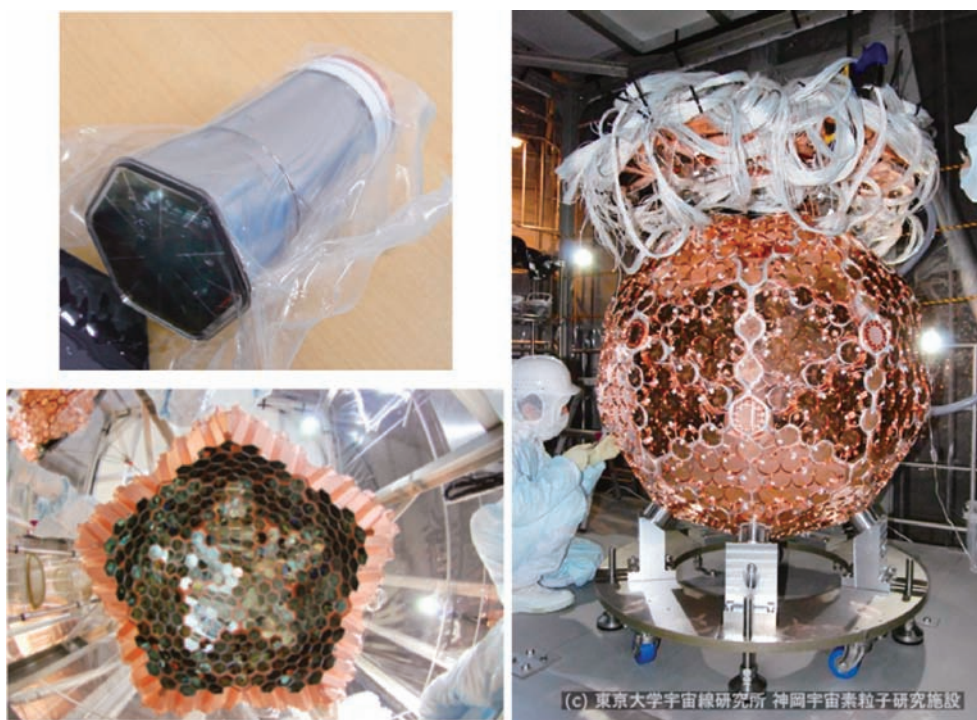


図 6 : XMASS 実験用極低放射能光電子増倍管とその取り付け作業

左上の写真が XMASS 実験用に特別に作られた光電子増倍管 (Hamamatsu R10789)。低放射能の材料を選定した特別製の光電子増倍管である。低温の液体キセノン温度で動作し、真空紫外光である液体キセノンからの発光を効率よく検出できる。左下がその光電子増倍管を取り付けるための高純度の銅製取り付け治具。右の写真が光電子増倍管を取り付けている様子である。埃や塵によって汚染されない様に、クリーンルームで作業が行われた。建設時の写真は他にも、宇宙線研究所 附属神岡宇宙素粒子研究施設の Web Page に数多く載せられているので、興味ある方は、是非そちらを参照してほしい。

(<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/status.html>)



図7：エネルギー再構成装置概念図

オレンジ色で描いた銅製のロッドの先に放射線源を取り付け、XMASS装置内部に導入して、エネルギーと事象位置を較正する。



図8：エネルギー再構成に用いるロッド先端部 (^{57}Co の場合)
ロッドによって、シンチレーション光が遮られない様、細棒の先に線源を取り付けている

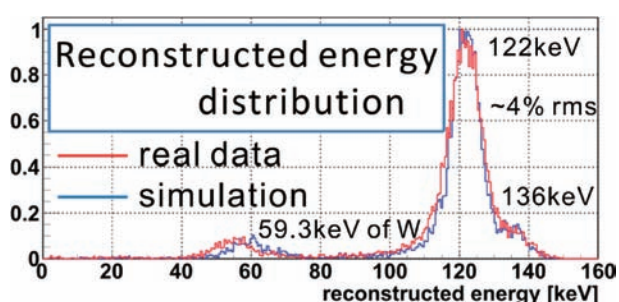


図9：エネルギー較正を行った際の実データと Monte Carlo シミュレーションの比較

Monte Carlo シミュレーションでは、エネルギー較正に用いた機器のジオメトリはもちろんのこと、液体キセノンの諸特性（屈折率、発光スペクトル、散乱、吸収）等全て考慮してある。図は ^{57}Co 線源を導入した際の実データと、この実データを元にパラメータを調整した Monte Carlo シミュレーションの結果を示している。これらが良く一致しており、Monte Carlo シミュレーションに用いた各種パラメータが妥当であることを示唆している。

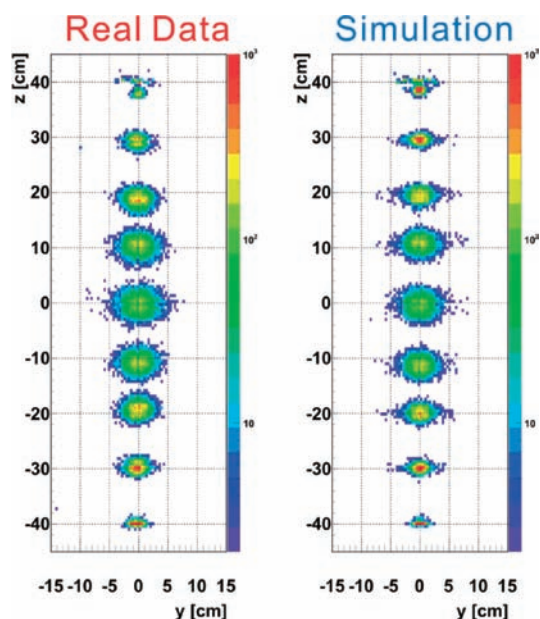


図10：エネルギー較正時の事象を再構成したもの

^{57}Co が $z = \pm 40, \pm 30, \pm 20, \pm 10, 0$ cm の場所に置かれている。実際のデータでは線源が正しい位置に再構成され、また分解能に関しては Monte Carlo シミュレーションで予測された値であることが分かる。

を元に、エネルギーと位置を再構成する性能を評価している。図7、8はエネルギー較正装置の概念図とロッド先端部の写真である。ガンマ線源としては ^{57}Co 、 ^{241}Am 、 ^{109}Cd 、 ^{55}Fe 、 ^{137}Cs 等を用いている。これらから放出されるガンマ線（及びX線）の中にはエネルギーの小さいものも含まれるが、それらはロッドの近傍で発光し、一部の光はロッドで遮られ光電子増倍管に到達せず、従って、エネルギーや事象点の再構成に影響がでる。このような効果を含めて、XMASS装置全体がどのように振る舞うかを Monte Carlo シミュレーションで評価し、エネルギーと事象位置を再構成している。図9、10は ^{57}Co 線源を導入した際を実際のデータと Monte Carlo シミュレーションを比較したものである。再構成したエネルギー、事象位置ともに良い一致を示していることが見て取れる。

放射性希ガスの定量

外部から侵入する放射線が外水槽や液体キセノン自己遮蔽によって大幅に減衰される一方、検出媒体そのものであるキセノンに放射性不純物が混入している場合、それは非常に深刻なバックグラウンドとなる。キセノンはもともと気体である上、蒸留操作によって純化されているので、ウラン、トリウム、カリウムと言った天然放射性元素に加え、ラドン

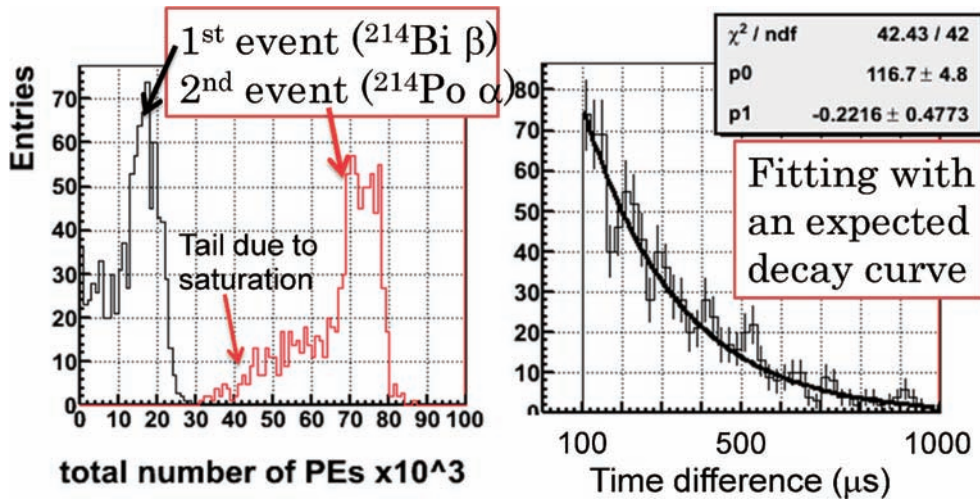


図11: ^{222}Rn の遅延同時計数のスペクトル (左) と時間スペクトル (右)

この測定では、後発信号である ^{214}Po の α 線の発光が極めて大きいため、XMASSの光電子増倍管642本の内の半数のGainを小さく設定している。

(^{222}Rn)、トリウム (^{220}Rn)、クリプトン (^{85}Kr) と言った放射性希ガスとその娘核に特に気を付ける必要がある。

ラドン (^{222}Rn) は半減期が3.8日で、半減期22.3年の鉛210 (^{210}Pb) まで速やかに崩壊する。この一連の崩壊の途中にあるポロニウム214 (^{214}Po) は半減期167 μs でアルファ崩壊するため、その親核のビスマス214 (^{214}Bi) のベータ崩壊 (半減期19.9分) を先発信号、 ^{214}Po のアルファ崩壊を後発信号として同時遅延計数を行うと、バックグラウンドを排除して、僅かな量の ^{222}Rn を測定出来る。図11は同時遅延計数のスペクトルと時間スペクトルである。この解析の結果、 ^{222}Rn は検出器全体で $8.2 \pm 0.5 \text{ mBq}$ と見積もられた。この値は、XMASS実験の最終目標値1.0mBqと比べて大きな値となっているが、 ^{222}Rn がXMASS装置内でどのように分布しているか等詳細を調べているところである。 ^{220}Rn についても、 ^{220}Rn (半減期55.6秒のアルファ崩壊)を先発信号、 ^{216}Po (半減期0.145秒のアルファ崩壊)を後発信号とした遅延同時計数を用いて ^{222}Rn 量を測定した結果、90%の信頼度で0.28mBq以下で、最終の目標値0.43mBqを既にクリアしているが分かった。

クリプトン85 (^{85}Kr) については、直接 ^{85}Kr を測定することは出来ないが、キセノンガスを蒸留する過程で、オフガスとして濃縮回収されたクリプトンガスをを用いて ^{85}Kr の存在比が $^{85}\text{Kr}/\text{Kr} = (0.6 \pm 0.2) \times 10^{-11}$ と測定されているので、キセノン中のクリプトンを測定することで、 ^{85}Kr の影響を評価出来る。 Kr の測定は、ガスクロマトグラフィーと大気圧イオン化質量分析器 (Atmospheric Pressure Ionization

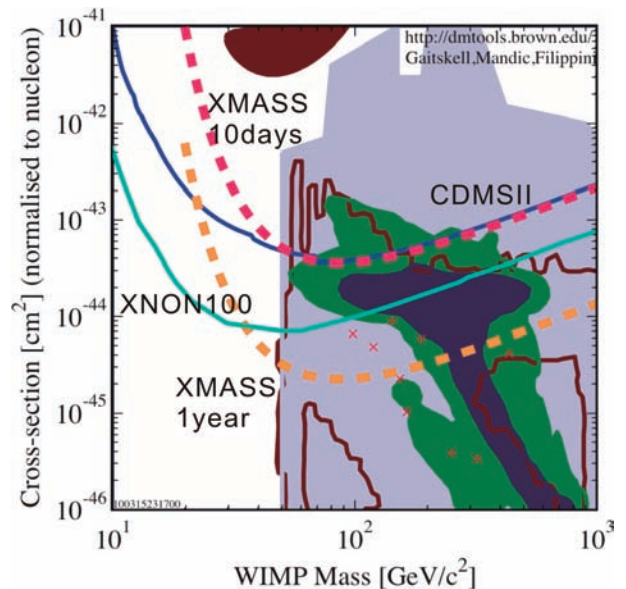


図12: 暗黒物質探索の感度 (WIMPsと核子の散乱断面積)

XMASS800kg検出器で10日、1年の測定を行った時に予測される感度を赤、オレンジの破線で表わしている。緑と濃青の実線の上側は、XENON100、CDMSIIによって既に排除されたパラメータ領域。等高線図は、理論的に予測される暗黒物質 WIMPs 領域。XMASSで散乱断面積 $\sim 10^{-45} \text{ cm}^2$ までの広い領域を探索できる。

Mass Spectrometer, APIMS) を組み合わせた測定システムによって、行われている。この装置は、我々の手で開発されたもので、前段のガスクロマトグラフィーによってキセノンとクリプトンを分離し、キセノンガスのみを後段のAPIMSに導入してKrを測定する仕組みとなっている。このシステムで10pptレベルのKrが測定出来ることを実証されて

おり、現在、XMASS 実験装置からキセノン試料をサンプルして、クリプトンを測定している。また、これとは独立に、XMASS に一部導入されているフラッシュADCを用いて、 ^{85}Kr を直接測定しようと試みている。これは ^{85}Kr の一部（0.4%）がベータ線（173keV）とガンマ線（514keV）にカスケード（ $\tau=1.0\mu\text{s}$ ）に崩壊することを利用したもので、やはり遅延同時計数の手法でバックグラウンドを除いた測定である。

これらの他にも、外水槽で測定されたミュー粒子の事象とそれに続く事象、検出器外部にガンマ源を設置した場合のエネルギーと事象位置の再構成、キ

セノン中の各種ガス（水素、酸素、窒素等々）の定量等など数多くの課題を精力的にこなしている。こういった一連の作業を終え次第、一刻も早く暗黒物質探索の結果を出すので、楽しみに待って頂きたい。XMASS 実験で予想される暗黒物質に対する結果は、これまでの最も厳しい制限を与えている XENON100実験よりも更に数～10倍程高い感度を実現すると期待されている（図12）。この領域（散乱断面積で 10^{-45}cm^2 の領域）は超対称性理論が予測する領域と大きく重なっており、WIMPsが発見される可能性の高い領域である。これからも暗黒物質の研究、特に XMASS に注目してもらいたい。

研究紹介

重力波推進室の発足

黒 田 和 明

【東京大学宇宙線研究所】

1. はじめに

LCGT 計画が平成22年6月最先端研究基盤事業として採択されてから建設が開始されたことに伴い、平成23年4月1日に大型低温重力波望遠鏡（LCGT）計画を推進するための重力波推進室が発足しました。

LCGTの研究目的は、低温技術を駆使した3km基線長のレーザー干渉計を神岡地下に設置（図1）して世界に先駆けて重力波を検出し重力観測による重力波天文学を展開していくことですが、まず、LCGT計画の予算化について、この場をお借りしてお礼申し上げます。第一に、辛抱強く支援して頂い

た宇宙線研究者会議（CRC）の研究者の皆様や天文や高エネルギーなどの隣接分野の研究者の皆様、これら研究者組織を束ねる日本学術会議の関係委員の皆様にお礼申し上げます。次に、概算要求に関連して意を尽くして頂いた大学当局本部の皆様、また、最終的に予算化に尽力して頂いた文部科学省の関連部局の皆様に感謝します。これら多くの人々の支援がなかったならとても重力波の予算化は実現しませんでした。また、この予算化に際して、宇宙線研究所の梶田所長には LCGT Collaboration に身を投じて尽力して頂き、現在はプロジェクトの Program Integrator (PI) として運営の責務を担っていただいています。

さて、本重力波推進室は柏キャンパスに設置されますが、神岡現地での建設が本格化し始め、現在要求している建物が完成する時期（平成25年4月の予定）をめどに神岡に移動する予定であり、それまでの間、現地での建設活動を実質的に担う神岡分室を設けます。本重力波推進室は、LCGTの建設が終了して本格観測を開始する時点で重力波観測研究センター（仮称）として改組要求される予定です。平成23年4月1日時点での陣容は、表1に示す通りですが、本稿執筆時点で、公募中の教授に川村氏が決定され、技術補佐員2名が採用されました。また、5年程度毎に従事する研究プロジェクトを替わることになる新しい技術職員が重力波担当となって7月中

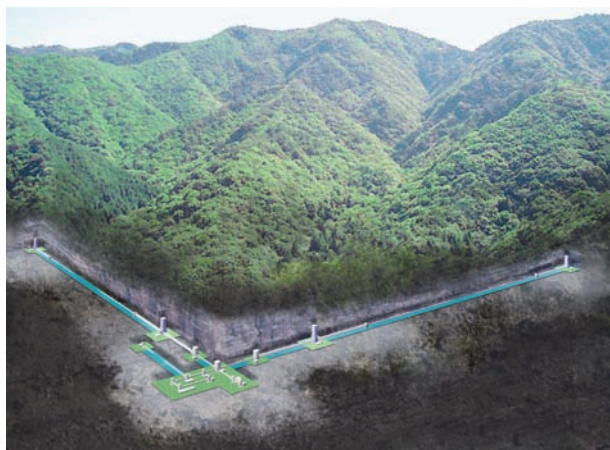


図1：神岡鉱山地下に設置が進められる大型重力波望遠鏡

表 1：重力波推進室の陣容（平成23年 4 月 1 日現在）

推進室長 黒田和明教授		
柏地区	教授（公募中）	
	中谷一郎客員教授	三代木伸二助教
	齊藤芳男客員教授	山元一広特任助教
	川村静児特任准教授	高橋竜太郎特任助教
	木村誠宏客員准教授	廣瀬榮一特任研究員
	鈴木敏一客員准教授	
神岡分室	分室長 大橋正徳准教授	内山 隆助教
		宮川 治特任助教
		大石奈緒子特任助教
技術職員		石塚秀喜技術専門職員
事務室	神岡事務室職員（要求予定）	
	菊地理恵事務補佐員	
	眞島千恵子事務補佐員	
	事務補佐員（公募）	

旬以降加わります。なお、事務補佐員 1 名は特任専門職員に昇格し、公募の事務補佐員は新しい人が決まりました。重力波計画が国立天文台と高エネルギー加速器研究機構との協力で推進されている状況を反映して、重力波推進室の 2 名の特任助教は国立天文台からの出向教員であり、客員教授の 2 名は KEK 所属でありながら LCGT 建設に専念することとなっており、客員准教授 1 名は KEK の業務と LCGT の業務を同程度のウェイトとして LCGT 建設に参加しています。

2. 重力波と宇宙線研究

重力波は、アインシュタインの一般相対性理論で予測される時空のひずみ波であり、光の速度で空間を横波として伝搬します。重力波の直接検出のために 1990 年代に開始された大型レーザー干渉計の建設とそれによる観測は一段落しましたが、これまで直接に重力波を観測した例はありません。また、これら検出器の建設開始当時は超新星爆発に伴う重力波が有力な候補として挙げられていて、すぐにでも重力波の検出が現実になるという漠然とした考えがありましたが、現在では超新星爆発に伴う重力波は極めて強度が弱く、また、波形の予測がつかないことから検出は容易ではないとされています。これに代わって、最有力の候補天体は連星中性子星の合体で

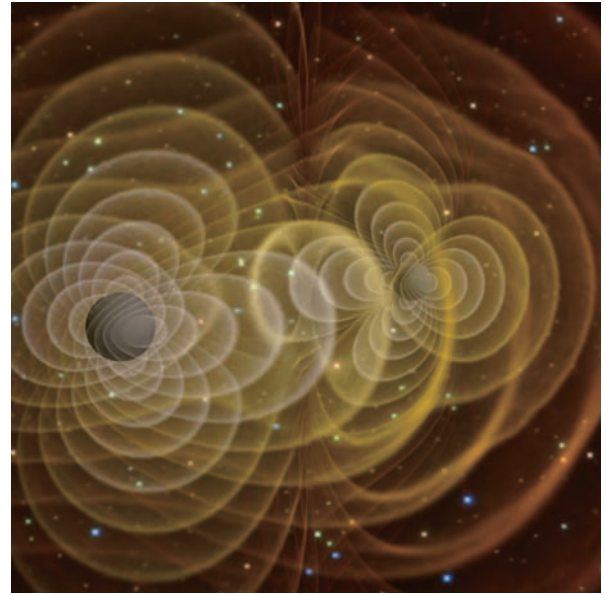


図 2：計算機シミュレーションによる連星ブラックホール合体の際に放出される重力波の様子
(Credit: Henze, NASA)

あり、近年はブラックホール連星の合体による重力波も有力視されています（図 2）。連星中性子星の合体では、ほぼ間違いなくブラックホールが生成され、生成された直後に準固有振動に伴う重力波が観測されるはずで。連星中性子星合体は、short gamma 線バースト源ではないかという予測もあるため、 γ 線望遠鏡による観測との連携も真剣に取り組まれていくことになります。

重力波といえば、観測の手段も目的も宇宙線の観測とは大きく異なっているように見えますが、この重力波が広い意味での宇宙線研究に属しているとされている訳は、超新星爆発がニュートリノと重力波の放出源であるばかりでなく高エネルギー γ 線や宇宙線の源でもあるというように、重力波が伴う事象はダイナミックな事象でなければ発生し得ないためです。これは、ダイナミックな現象に関わる対象を探ろうとする宇宙線の研究では、大抵の場合、重力波も一緒に放出される現象と重なっている、と考えられます。これは、重力波による観測が宇宙線による観測で見えない側面を補強し、観測対象の物理や現象をより良くとらえ理解するのに役立つということです。

3. プロジェクトの現状

重力波望遠鏡本体は、神岡鉱山の地下に設置されるため、新たに空洞掘削を行います。空洞の設計は、レーザー干渉計の設計に合わせた真空装置、防振装置、低温装置などの形状、据え付け工程、干渉計イ

ンストールの工程・手順などを考慮して慎重に行われますが、10万立米に及ぶ掘削量の掘削工事は、現地で活動する他の研究プロジェクトにも影響を与え、また、周辺の地域にも大きい影響を与えることになりますので、これら関係者の理解と支援を頂くことが不可欠であり、重力波推進室の神岡分室を中心として鋭意取り組んでいるところです。なお、空洞掘削が、昨年度着手した真空装置の製造よりも1年遅れて着手されることから、長さ12m、直径80cmの真空ダクト（後年度製作を入れて全部で500本）が今年度次々に完成・納品されるということに関連して、未完の空洞に代わり、旧神岡鉄道の廃トンネルをそれらの臨時の設置場所として借り受け・準備しています。真空装置は、経費のウェイトの高い項目ですが、経費節減のため、一企業に一括発注という形を取らずに、材料の調達から加工手順の設計、工程管理まで担当の研究者が行っています。

来年度の終わりには、空洞、真空装置など、低温重力波望遠鏡を納める施設がほぼ完成する予定であり、これに合わせて、レーザー干渉計本体部分、防振装置、低温装置などの詳細設計・製作を進めています。特に、レーザー干渉計の詳細設計では、今後の技術進展にも柔軟に対応して最大限の感度が達成できる配慮がなされています（図3）。防振装置は、TAMA（国立天文台に設置された300m基線長レーザー干渉計）で開発された Seismic Attenuator System（SAS）と同じ方式を使用しますが、鏡の重さや大きさが異なるため同じものは使えません。LCGTではTAMAに比べてより高性能な仕様になっています。レーザー光源は実験室では、 $1.064\mu\text{m}$ で100W

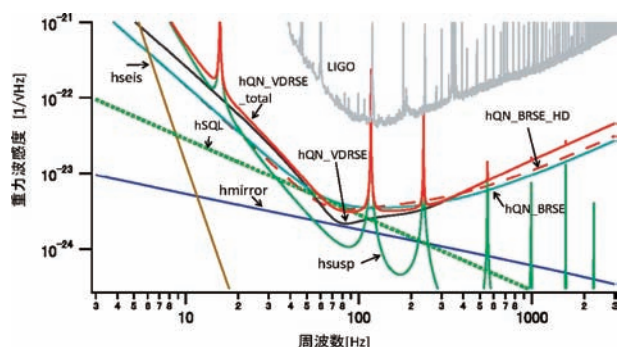


図3：レーザー干渉計の感度を最大にする光学設計の作業結果。右上に示すLIGOで達成された感度よりも1桁以上良い感度を目指している。記号の意味は次の通り：hseis：地面振動、hmirror：鏡の20Kでの熱振動、hSQL：量子限界、hsusp：鏡懸架系の雑音、hQN_VDRSE：可変型狭帯域RSEの雑音、hQN_BRSE：広帯域RSEの雑音、hQN_VDRSE_total：可変型狭帯域RSEの総合雑音。

を超える高出力の光源を開発しており、LCGT仕様になかった180Wの出力のものを調達します。低温鏡のための冷凍機やクライオスタットの製作には、CLIO（神岡地下設置の低温鏡レーザー干渉計プロトタイプ）による技術確立を生かし、大型化する懸架装置の設計を進めています。また、鏡の基材として用いる高純度 Al_2O_3 結晶材は低温鏡に不可欠なものです。LCGT建設のスケジュールでは、平成26年度の秋をめどとして、低温を使用しない3kmスケールのレーザー干渉計の試運転を開始する予定です。低温仕様の本格的な検出器は平成28年度に完成し、それ以降、本格的な観測を開始します。

世界では、TAMAと同世代のkmスケール干渉計による共同観測が一段落しましたが、これまで重力波の検出には成功しておらず、更なる感度向上を目指してレーザー干渉計の改良が続けられています。米国LIGOプロジェクト（図4）では、Washington州HanfordならびにLouisiana州Livingstonに設置されたそれぞれの干渉計の感度をおおむね1桁上げるために、レーザー出力を大きいものに代え、反射鏡を重く大きくし、懸架装置・防振装置を更新する作業をAdvanced LIGO計画として進めており、平成27年からの観測を目指しています。なお、Hanfordの検出器には、4km基線長のレーザー干渉計と2km基線長のレーザー干渉計が同一真空装置の中に組み込んでありましたが、Advanced LIGOでは、



図4：米国LIGOの検出器。上段はLouisiana州Livingston、下段はWashington州Hanford。それぞれ4kmの基線長を持ち、連星中性子星合体に対して世界最高感度を達成した。



図5：European Gravitational Observatory (EGO) が運営するフランス・イタリア合同の Virgo 検出器。ピサ近郊にあり基線長 3 km で低周波領域まで効果のある防振装置 SAS に特徴がある。

2 km でなく 4 km とすることで、これを取り出し、オーストラリアの AIGO 計画に組み入れ、LIGO-Australia 計画として進められています。この部分は、オーストラリアの真空装置など施設建設の予算化を待っている状態です。同様にイタリア、フランスの共同計画 Virgo(図5)でも、これまでのレーザー干渉計をより感度の出せるものに変更する Advanced Virgo 計画の予算が認められ、改良が行われています。また、TAMA と競い合ったイギリスとドイツの合同計画 GEO では、600m 基線長を活用してより高い周波数に感度の重点を置く改良を行っていましたが、重力波国際委員会 (GWIC、IUPAP の作業部会である PaNAGIC のサブ委員会) からの要請もあって、これら改良のために世界の重力波検出器がストップしている間に、AstroWatch と称して観測を続ける責務を担うことになりました。

以上の状況の中で、km スケールのレーザー干渉計としては遅れて建設がスタートした LCGT にとって、海外の進んだ技術やノウハウを取り入れることは、経費の節減だけでなくマンパワーの充実、建設時間の短縮などをはかることができるため、積極的に進めており、学术交流を活発化することにもつながっています。さらに、本研究設備がアジアでの学術研究の一拠点としての機能を果たしていくために、近隣諸国の関連する研究者を新たに共同研究者として加えていく活動を機会をとらえて進めています。

国際観測という観点からは、GEO グループが米

LIGO と共同で LIGO Science Collaboration (LSC) と呼ばれる研究者組織に参加して共同で Advanced LIGO の建設に参加し、LSC と Virgo とが共同観測の協定を結ぶなど、世界のレーザー干渉計グループが一体となって共同観測に向けた取り組みを行っています。このような共同観測網への参加については、各プロジェクトの観測に関わっている研究者から LCGT も早期に参加することを薦める意見が出され、また、研究論文においても LCGT の参加による絶大な効果の指摘がなされており、私たちは LCGT が完成してその感度が意味のあるレベルに達してから協力を開始する方針を表明しています。

4. 今後の課題と希望

LCGT の技術的裏付けは、レーザー干渉計技術が TAMA で低温鏡技術が CLIO で完成されたとは言え、実機に装着しての R&D はその経費が手当てできなかったために行われて来ませんでした。海外の重力波プロジェクトで R&D のために十分な経費とマンパワーがつけ込まれているのに対照的です。特に SAS では、装置の個性が出やすい性質があるため、実機での調整の負担は計り知れません。このため、実機へのインストールまでの 2 年余の時間を活用して、TAMA を用いた実機テストを行う計画です。また、低温鏡とその懸架装置の設計・製作・インストールに関しても、調整を含んだ作業が必要であり、インストールに入る前に実機によるリハーサルが不可欠です。LCGT 目標達成までのスケジュールでは、これら LCGT を特徴づける技術要素を含む項目の広い意味の R&D を効率的に盛り込んだロードマップを作成しています。

以上述べてきた LCGT の建設には、国内外の多くの共同研究者が携わっています。LCGT による重力波の検出という一つの目標に向かってその実現方法を協議し、具体化の作業を進めて行く過程で、すべての研究者が一丸となって協力して行こうという強い体制が出来上がりつつあります。まだ、人員が不足している部分もありますが、着実に進展して行くプロジェクトの姿は、若い研究者を惹きつけ、学生に希望を抱かせると期待されます。宇宙線研究所に発足した重力波推進室がこれら共同研究者を束ねるかなめとして機能して行くように努力したいと考えます。これからも引き続きご支援をよろしくお願い致します。

人 事 異 動

発 令 日	氏 名	異 動 内 容	職
H23. 3. 16	伊 部 昌 宏	新規採用	准教授
H23. 3. 16	戸 村 友 宣	新規採用	特任助教
H23. 3. 31	関 口 豊 和	任期満了	特任研究員
H23. 3. 31	太 田 一 陽	任期満了	特任研究員
H23. 3. 31	増 田 正 孝	任期満了	特任研究員
H23. 3. 31	竹 内 康 雄	委嘱満了	客員教授
H23. 3. 31	大 橋 秀 男	委嘱満了	客員教授
H23. 4. 1	山 元 一 広	新規採用	特任助教
H23. 4. 1	廣 瀬 榮 一	新規採用	特任研究員
H23. 4. 1	杉 山 昇 平	新規採用	特任研究員
H23. 4. 1	山 内 大 介	新規採用	特任研究員
H23. 4. 1	陳 鼎	新規採用	特任研究員
H23. 4. 1	井 上 進	新規採用	特任研究員
H23. 4. 1	Marti Magro Lluís	新規採用	特任研究員
H23. 4. 1	西 村 康 宏	新規採用	特任研究員
H23. 4. 1	中 谷 一 郎	再委嘱	客員教授
H23. 4. 1	齊 藤 芳 男	再委嘱	客員教授
H23. 4. 1	鈴 木 敏 一	再委嘱	客員教授
H23. 4. 1	木 村 誠 宏	再委嘱	客員准教授
H23. 4. 1	増 田 公 明	新規委嘱	客員教授
H23. 5. 16	柏 麗 麗	新規採用	特任研究員
H23. 6. 1	田 中 靖 郎	新規採用	特任教授
H23. 6. 16	奥 村 公 宏	昇任	准教授
H23. 6. 30	田 中 靖 郎	任期満了	特任教授
H23. 7. 1	川 村 静 児	新規採用	教授
H23. 7. 1	梁 炳 守	新規採用	特任研究員
H23. 7. 19	東 谷 千比呂	新規採用	技術職員
H23. 7. 31	潮 見 幸 江	任期満了	特任研究員
H23. 8. 1	大 石 奈緒子	在籍出向終了	特任助教

ICRR-Seminar 2011年度

7月20日(水) 田島 治 (高エネルギー加速器研究機構)

“インフレーション宇宙の痕跡を探す！—CMB偏光の精密測定”

7月13日(水) 中山 浩幸 (高エネルギー加速器研究機構)

“Status of SuperKEKB/Belle-II project”

7月6日(水) Marco Casolino (RIKEN - Advanced Science Institute and INFN - Rome Tor Vergata)

“Energy spectrum of proton and helium measured by PAMELA and acceleration of cosmic rays in the galaxy”

6月29日(水) 高部 英明 (大阪大学レーザー研)

“レーザー宇宙物理：超新星残骸衝撃波と粒子加速を中心に”

6月22日(水) 田中 靖郎 (マックスプランク研究所)

“Relativistically Broad Iron-K Line”

6月15日(水) 塩澤 真人 (宇宙線研究所)

“T2K 実験の最新結果報告”

6月8日(水) 家 正則 (国立天文台)

“すばる望遠鏡・補償光学・次世代超大型望遠鏡”

6月1日(水) 手嶋 政廣 (宇宙線研究所)

“超高エネルギーガンマ線天文学とその将来”

5月20日(金) 坂井 賢一 (高エネルギー加速器研究機構)

“南極周回気球実験による太陽活動極小期の宇宙線反陽子スペクトラム測定”

4月27日(水) 奥村 公宏 (宇宙線研)
 “T2K の初年度データを用いた振動解析結果”

ICRR-Report 2010年度

ICRR-Report-581-2010-14

“Study of gravitational radiation from cosmic domain walls”

Masahiro Kawasaki, Ken'ichi Saikawa.

ICRR-Report-582-2010-15

“Differentiating CDM and Baryon Isocurvature Models with 21cm Fluctuations”

Masahiro Kawasaki, Toyokazu Sekiguchi, and Tomo Takahashi.

ICRR-Report-583-2010-16

“Direct Detection of Electroweak-Interacting Dark Matter in the Universe”

Junji Hisano, Koji Ishiwata, Natsumi Nagata, and Tomohiro Takesako.

ICRR-Report 2011年度

ICRR-Report-584-2011-1

“Cosmological Aspects of Inflation in a Supersymmetric Axion Model”

Masahiro Kawasaki, Naoya Kitajima, and Kazunori Nakayama.

ICRR-Report-585-2011-2

“Open inflation in the landscape”

Daisuke Yamauchi, Andrei Linde, Atsushi Naruko, Misao Sasaki, and Takahiro Tanaka.

ICRR-Report-586-2011-3

“R-symmetry Matching In SUSY Breaking Models”

Jessica Goodman, Masahiro Ibe, Yuri Shirman, and Felix Yu.

ICRR-Report-587-2011-4

“Cosmological effects of decaying cosmic string loops with TeV scale width”

Masahiro Kawasaki, Koichi Miyamoto, Kazunori Nakayama.

ICRR-Report-588-2011-5

“Constraints on Direct Gauge Mediation Models with Complex Representations”

Kentaro Hanaki, Masahiro Ibe, Yutaka Ookouchi, and Chang-Soon Park.

ICRR-Report-589-2011-6

“Higher Order Corrections to the Primordial Gravitational Wave Spectrum and its Impact on Parameter Estimates for Inflation”

Sachiko Kuroyanagi, and Tomo Takahashi.

No.77

2011年8月31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