

CRC シンポジウム総括：

宇宙線分野の現状と将来計画

平成 22 年度宇宙線研究者会議実行委員会

将来計画冊子編集ワーキンググループ

平成 23 年 6 月 30 日

目次

| | |
|--|----|
| 1 . はじめに | 3 |
| 2 . 宇宙線研究の現状 | 4 |
| 2-1 . 高エネルギー天体物理学 | |
| 2-2 . 非加速器素粒子物理学 | |
| 2-3 . 重力波天文学 | |
| 2-4 . 他分野との境界領域 | |
| 3 . 将来計画の紹介 | 9 |
| 3-1 . 宇宙線の起源・組成と加速機構に関する研究計画 | |
| 3-2 . ニュートリノに関する研究計画 | |
| 3-3 . ダークマターに関する研究計画 | |
| 3-4 . 重力波に関する研究計画 | |
| 3-5 . ガンマ線バーストなどに関する研究計画 | |
| 4 . 結論に代えて..... | 12 |
| | |
| Appendix 1. CRC 将来計画シンポジウム プログラム | 13 |
| Appendix 2. 研究計画一覧表 | 14 |
| Appendix 3. 研究計画サマリー | 17 |
| LCGT プロジェクト..... | 18 |
| スペース重力波アンテナ DECIGO..... | 18 |
| XMASS 実験..... | 19 |
| GADZOOKS!! プロジェクト..... | 20 |
| NEWAGE(方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験) | 21 |
| カムランドの将来計画..... | 22 |
| ハイパーカミオカンデ実験構想..... | 24 |
| CTA (Cherenkov Telescope Array) | 25 |
| CALET..... | 26 |
| Tibet AS+MD+YAC Project..... | 27 |
| テレスコープアレイ実験 将来計画 (TALE 計画 , TA-phase2 計画) | 28 |
| JEM-EUSO ミッション..... | 29 |
| IceCube/ARA 実験..... | 30 |
| 極域での宇宙および地球のガンマ線バースト現象の国際共同観測..... | 31 |
| ガンマ線バーストによる初期宇宙観測と暗黒エネルギーの解明「Gamma-ray burst for UNravelling Dark Ages Mission : GUNDAM」の提案..... | 33 |

| | |
|-------------------|----|
| SciCR 実験..... | 35 |
| LHCf 実験..... | 36 |
| 宇宙線による雲核生成実験..... | 37 |

1. はじめに

CRC (宇宙線研究者会議)¹では、2010年9月16日と17日の二日間、東京大学柏キャンパスにおいて将来計画シンポジウムを開催した。各研究グループの代表者がそれぞれ講演を行い、活発な議論が行われた。登録参加者は84名であった。(シンポジウムのプログラムについてはAppendix 1を参照されたい。)本シンポジウムは、宇宙線分野における将来の大型・中型計画の提案と議論が行われた他、小規模で萌芽的・境界領域的な計画の紹介も行われ、宇宙線研究の現在と将来を俯瞰するよい機会となった。この文書は、このシンポジウムの会議録として、現在宇宙線分野で検討されている様々な科学目標とその相互の関連を、シンポジウムで提案された計画をもとに俯瞰するという試みである。

宇宙線の研究は、素粒子物理学から宇宙物理学、さらには地球科学までを覆う非常に広い学問的領域をカバーしている。宇宙線研究は素粒子物理学の創生期においては、高エネルギー粒子による物質の微細構造研究手段として唯一のものであった。次第にその役目は粒子加速器による高エネルギー物理学実験に譲られ、宇宙線研究の主眼は粒子加速源天体の追求など、天体物理学的側面に移ってきた。そして、研究の対象も宇宙高エネルギー粒子線にとどまらず、高エネルギーガンマ線、ニュートリノ、重力波、暗黒物質にまで拡大している。さらに、陽子崩壊探索をはじめとする非加速器素粒子物理学実験も広い意味での宇宙線研究に含めることができる。

日本における近年の宇宙線の実験的研究の多くは、東京大学宇宙線研究所をホストとするプロジェクトを中心とし、多数のCRC会員が共同利用研究者として参加する形式で行われてきた²。乗鞍岳で1950年代に設置された宇宙線研究所の前身である宇宙線観測所は我が国最初の共同利用研究機関であり、宇宙線研究所(田無市時代)のミュートロン実験装置、山梨県明野観測所の空気シャワー観測装置、高山におけるエマルジョン観測、気球による宇宙線観測、宇宙物質研究用質量分析装置、などが1980年代までに実現された。その後、明野観測所周辺の広域空気シャワー観測装置AGASA³、オーストラリアにおけるガンマ線観測用の大気チェレンコフ望遠鏡CANGAROO⁴、日中共同のチベット高原の空気シャワー観測装置⁵、岐阜県神岡鉱山地下のスーパーカミオカンデ⁶、米国ユタ州におけるテレスコプアレイ⁷などの大型実験観測装置が2000年代にかけて実現した。これらの装置は、

¹ <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/CRC/>

² 戦後50年間の宇宙線研究について詳しくは「宇宙線研究50年の歩み」(西村純、日本物理学会誌 第51巻7号、1996年)を参照されたい。

³ <http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/>

⁴ <http://vesper.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

⁵ <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/em/index-j.html>

⁶ <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index.html>

⁷ <http://taws100.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

ニュートリノ振動の証拠を見出し、超高エネルギーガンマ線放出天体を発見し、最高・超高エネルギー宇宙線の到来方向の異方性の兆候を見出すなど、多くの成果を上げてきた。しかし、これらの装置をもってしても、宇宙線の起源の問題の解明には不十分であり、ガンマ線放出天体における加速粒子の種類も判別されておらず、陽子の崩壊例ははまだ見つかっていない。一方、天体の放射する重力波の検出を目指す研究グループも CRC に参加するようになり、2010 年度には大型低温重力波望遠鏡 LCGT の建設が始まった。

これらをはじめとする宇宙線研究分野の重要課題を追及していくためには、さらなる大規模の実験観測装置が必要である。そのために必要とされる人的資源や予算規模の点からもその多くは国際共同実験として計画されると共に、コミュニティ内での推進に関する一定の合意の形成がますます重要となってきた。本冊子は、CRC 会員が構想しているこのような大型の将来計画について今回のシンポジウムで行われた報告と議論をまとめると共に、小規模計画も含めてシンポジウムに参加表明した全ての計画を収録した。宇宙線の研究がカバーする広大なサイエンスの領域を俯瞰するために、宇宙線分野の大型将来計画だけでなく、走りつつある中規模計画、萌芽的な小計画も含め周辺分野との連携的計画についても考慮した内容となっている。

2. 宇宙線研究の現状

現在の宇宙線研究は、大きく次の四つの分野を内包している。個々の研究はこれらの分野に特化するものや、複数の分野にまたがっているものもある(図 1)。

- 1) 高エネルギー天体物理学
- 2) 非加速器素粒子物理学
- 3) 重力波天文学
- 4) 他分野との境界領域

次節以降で個々の研究グループによる将来計画を紹介していくが、その前にこの節では、これらの研究領域の現状について、日本の貢献を中心として簡単にまとめておく。

2-1. 高エネルギー天体物理学

1912年に V. Hess により宇宙線が発見されて 100 年が経過しようとしているが、高エネルギー宇宙線がどこでどのように生まれて地球に到達するのか、という「宇宙線の起源の謎」はいまだに十分解明されておらず、高エネルギー天体物理学における中心的なテーマの一つとして残されている。ここ 20 年ほどの間に、X 線天文衛星による数々の成果と共に、地上の大気チェレンコフ望遠鏡と、Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡⁸などによる高エネルギーガンマ線観測が大きく進展し、超新星残骸やパルサー星雲、活動銀河核など、粒子を高エネルギーまで加速する天体の同定は進んできた。しかし、これらの天体で加速されている粒子が電子なのか、陽子を含む原子核なのかという基本的なことすらまだ解明されていない。後者であることが示されない限り、宇宙線の起源天体が見つかったということとはできない。また、宇宙線は陽子なのか、それより重い原子核なのかという組成の問題は、加速の問題と絡んで起源解明の鍵として長く論じられてきた。10¹⁴eV までの宇宙線は気球で直接観測することができ、日本グループの貢献も含めその組成は徐々に明らかになってきた。しかし、直接観測の困難な 10¹⁵eV 以上の宇宙線は、空気シャワー現象を通じて間接的に測定することしかできないため、陽子なのか、それより重い原子核なのかという組成の問題が当初から論議されてきた。空気シャワー現象を様々な方法で観測することにより、間接的な推定が試みられてきたが、実験により異なる結論が得られるという混沌とした状況がいまだに続いている。空気シャワー観測の解釈は超高エネルギーでの核相互作用モデルにも依存するので、加速器 (LHC) を用いた実験的検証も行われている。

観測される宇宙線の最高エネルギーは 10²⁰eV を超えている。宇宙マイクロ波放射による不透明性 (GZK カットオフ⁹) のため、これらの宇宙線の源は近傍の天体に限られるはずで

⁸ <http://fermi.gsfc.nasa.gov/>

⁹ K. Greisen, *Phys. Rev. Lett.* 16, 748 (1966); G.T. Zatsepin, V.A. Kuz'min, *JETP Lett.* 4, 78 (1966)

あるが、AGASA の観測データには GZK カットオフが見られず、 10^{20}eV 宇宙線の起源やこの極高エネルギー領域での物理法則の妥当性などについて様々な論議を呼ぶことになった。しかし、最近開始された大規模観測（南米の Pierre Auger 観測所¹⁰、後述する北米の Telescope Array）の観測では、GZK カットオフと矛盾しない結果が得られており、論議は収束しつつある。しかし、 10^{19}eV 以上の宇宙線は銀河磁場の影響が少ないため、加速した天体を指し示しているはずであるが、まだ観測例が少ないこともあり、対応する天体について結論を得るには至っていない。その組成についてもまた結論が得られていない。

最初にも触れたが、地上からの大気チェレンコフ望遠鏡を用いたガンマ線観測は、1989 年に Whipple 望遠鏡によりかに星雲の観測が成功した後、1990 年代から急速に発達し、現在では 100 を超える天体からの TeV 領域のガンマ線が観測されるにいたった。日本グループはオーストラリアと共同で CANGAROO 実験を継続的に行い、南天のガンマ線観測に対して先導的な役割を果たしてきた。H.E.S.S.¹¹、MAGIC¹²、VERITAS¹³の大型装置の完成により、TeV 領域ガンマ線観測は天文学の一分野としての地位を確立しつつあり、感度を向上させることによりさらなる進展が期待される領域となっている。

ガンマ線バーストは1960年代に核実験監視衛星によって発見されて以来謎に包まれた現象であったが、1990年代の Compton 衛星¹⁴に搭載された BATSE 検出器の観測で宇宙論的遠方の現象であることが確立し、1997年に BeppoSAX 衛星¹⁵によって X 線残光現象が高精度でとらえられたことがきっかけとなって、母銀河が観測されて赤方偏移が測られ、また超新星との関連が判明するなど研究の大きな進展がみられているが、いまだにその膨大なエネルギー源については謎のままである。日本グループの観測装置を搭載した HETE-2 衛星による観測も行われた。最近でも、専用の Swift 衛星が観測を続けているのに加え、Fermi 衛星にもガンマ線バーストモニターが搭載されており、地上望遠鏡のフォローアップ観測とともにその正体の解明への努力が続けられている。

¹⁰ <http://www.auger.org/>

¹¹ <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/HESS.html>

¹² <http://www.magic.mppmu.mpg.de/>

¹³ <http://veritas.sao.arizona.edu/>

¹⁴ <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/index.html>

¹⁵ <http://www.asdc.asi.it/bepposax/>

2-2 . 非加速器素粒子物理学

宇宙線研究の創生期においては素粒子の研究が主題であったのは前述のとおりであるが、現代においても多くのテーマを抱え、加速器による研究と相補的な役割を果たしている。

ニュートリノによる天文学は、岐阜県神岡鉱山の地下に設置された水チェレンコフ検出器 Kamiokande による 1987 年 2 月の超新星 1987A からのニュートリノバーストの発見により創生されたといえる。1996 年にはその十倍以上の検出体積を持つ Super-Kamiokande が観測を開始し、太陽ニュートリノの観測や大気ニュートリノの観測からニュートリノ振動の証拠を発見し、また核子崩壊が観測されないことから素粒子相互作用の大統一理論に制限を与えるなどの成果を上げてきた。Kamiokande の跡地に建設された液体シンチレーション検出器 KamLAND は、反電子ニュートリノに感度を持ち、原子炉や地球からのニュートリノを観測することに成功した。これらの結果から、三世代のニュートリノの混合を表す Maki-Nakagawa-Sakata 行列のパラメータ範囲が狭められつつあるが、¹³ (第 1 と第 3 のニュートリノの混合角) と (CP 対称性の破れを示す位相因子) と呼ばれる二つのパラメータはまだ測定されていない。原子炉を用いた混合角の測定や、加速器からのニュートリノビームを用いてこれらのパラメータを測ろうとする努力が続けられ、その兆候が見出されつつある。一方、宇宙線と同時に発生する超高エネルギーニュートリノは、その頻度が低いためまだ観測された例はない。IceCube¹⁶などの体積が 1 km³ クラスの検出器が建設の途上にあり¹⁷、ようやくその観測が始まろうとするところである。また、ニュートリノの質量がマヨラナ型であれば、ニュートリノレス二重ベータ崩壊の観測によって、ニュートリノ振動の場合の質量差でなく、質量そのものの測定が可能であり、低バックグラウンド検出器の改良が期待されている。

WMAP 衛星¹⁸の宇宙マイクロ波背景放射の観測などにより、観測されている宇宙の物質はわずか 4%に過ぎず、ダークマターが 23%、ダークエネルギーが 73%を占めているということが示された。未知のダークマターとダークエネルギーの正体を解明することは現代の天体物理学の最重要課題ともいえる。ダークマターの候補として有力とされているのは、超対称性理論で予言されるニュートラリーノなどのいわゆる WIMP (Weakly Interacting Massive Particle)で、CERN の LHC (Large Hadron Collider)¹⁹が本格稼働すれば発見される可能性はあるが、ビッグバン後に対消滅を逃れて現在のダークマター密度となるためにはパラメータに制限がある。しかし、そのパラメータは大きな不定性を持っており、物質との相互作用が弱いこととあいまって、実験的に直接検出することは非常に困難とされている。最近の実験ではようやくニュートラリーノの場合に期待される信号領域に届きつつあり、神岡でも XMASS 実験の第一期が開始されつつある。しかし、パラメータ領域を探

¹⁶ <http://icecube.wisc.edu/>

¹⁷ 本文書作成中に IceCube 実験の当初予定された建設は完了した。

¹⁸ <http://map.gsfc.nasa.gov/>

¹⁹ <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>

索し、確実な信号を得るにはさらなる大型実験が必要である。

2-3 . 重力波天文学

アインシュタインの一般相対性理論は重力波の存在を予言するが、その観測的な証拠は連星パルサーの公転軌道周期の減少から間接的にその存在が示されている²⁰だけで、直接的に観測された確実な例はいまだに存在しない。中性子星同士の連星とその合体や、超新星爆発の際に重力波が発生すると期待されているが、重力波の引き起こす時空の歪みは非常に小さく、その検出に対する技術的困難が克服され、レーザー干渉計技術を用いて観測の可能性が現実的になってきたのはごく最近のことである。日本ではTAMA300が建設され、基礎的な技術が着実に開発されてきた。この技術のもとに2010年から神岡鉱山地下にLCGTが検出されることになった(詳しくは後述)。米国ではLIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)²¹、イタリア・フランスではVIRGO²²という基線長2~4 kmの装置が稼働しており、さらに感度を上げるべく改造が行われている。LCGTはこれらとともに重力波の最初の発見を競い合いながら目指すことになる。

重力波は質量分布・運動によって発生するが、その透過力が抜群に高いので、他の手段では直接観測できない天体や宇宙の深奥からの情報をもたらす。それゆえ重力波の観測により、基礎物理、天体物理、宇宙物理において多くの進展が期待されている。たとえば観測が確実視されている連星中性子星の合体では、時間を追って変化する重力波の周波数から中性子星の質量を決定することが可能である。これによって原子核物理学の予言する中性子星の状態方程式に制限が与えられる。さらに複数台の検出器による観測が前提となるが、到来方向、地球から連星までの距離、軌道面傾斜角まで推定可能である。単独の放射源が距離指標になる連星合体は、将来の検出器では宇宙膨張を検証することすら提案されている。中性子星連星合体はガンマ線バースト(Short GRB)の正体である可能性もある。

その他の重力波源についても多くのサイエンスが期待されている。超新星からの重力波観測から、原始中性子星の形成や爆発に至る過程を解明することも期待されている。我々の銀河系近傍で超新星が観測されれば、重力波、ニュートリノ、電磁波などの多面的な観測が超新星爆発の解明に重要な情報を与えてくれるだろう。ブラックホールは、恒星質量のものから活動銀河核中心の巨大なものまで、重力波観測によってその存在と性質を明らかにできる天体である。また、宇宙マイクロ波背景放射のように重力波も背景放射が期待されており、宇宙初期インフレーション起源のものや、多数の銀河系外天体からの重畳的な重力波背景放射が考えられている。「晴れ上がり」以前の宇宙にさかのぼる情報を得るために、ニュートリノと並び重力波は有効な観測手段である。

²⁰ J. H. Taylor Jr. and R. A. Hulse, *Astrophys. J. (Lett.)* 196, L1 (1975)

²¹ <http://www.ligo.caltech.edu/>

²² <http://www.virgo.infn.it/>

さらに、宇宙線研究が基礎物理学の黎明期に反物質や s クォークといった数々の発見に活躍したことを思い起こすと、重力波という基本相互作用による放射の発見に向けた挑戦が宇宙線研究の新たな一分野として企画されていることは感慨深い。重力波天文学・重力波物理学の発展に伴い、宇宙線研究が分野総体としてよりいっそう活性化することが期待されている。

2-4 . 他分野との境界領域

宇宙線の研究から発展していった分野や、研究の目的を広げていった分野は数多い。故小田稔氏のグループは日本の X 線天文学を創生し、今や日本の天文学において大きな位置を占める分野に発展している。宇宙塵などの宇宙物質や、数十年にわたる宇宙線ミュオンの長時間変動の観測、衛星に障害を起こす太陽中性子などの太陽宇宙線の観測、古木の年輪の炭素同位体の計測による過去の宇宙線強度の解明、といった太陽地球環境系の研究も継続的に行われている。その中で、太陽活動と地球気候との関連に関わる宇宙線による雲核生成実験や、オーロラ電子加速にも関わる極域での気球による軟ガンマ線観測は、太陽地球系分野の重要トピックとなっている。また、大気中の放射性同位体の観測を通じて大気循環を探る地球環境の研究も継続的に行われている。宇宙線ミュオンによる乗鞍岳の透視像の観測は、同様の手法による火山中のマグマ観測の最近の成功にも結びついており、KamLAND による地球の放射性同位体からのニュートリノの観測とともに、地球物理学の新しい手法として大きな可能性を持っている。また LHC での超前方測定など超高エネルギー宇宙線とハドロン物理を横断する研究も始まった。

このように、宇宙線研究は、素粒子物理学、宇宙物理学と並び、地球物理学、太陽地球系科学とも幅広い接点を持ち、これらの境界領域で常に活発で先進的な研究が行われてきているといえる。

3. 将来計画の紹介²³

ここでは各計画の位置づけについて簡単に紹介する。各計画の目的や予算規模、準備状況については Appendix 2 に一覧表を載せた。各研究代表者自身による計画のサマリー（1 ページ程度でお願いした）については Appendix 3 をそれぞれ参照されたい。

3-1. 宇宙線の起源・組成と加速機構に関する研究計画

CALET (CALorimetric Electron Telescope)は国際宇宙ステーション上の「きぼう」暴露部の第 2 期利用ミッションとして設置される電子などの高エネルギー宇宙線観測装置であり、2010 年 4 月に開発フェーズに移行し、2013 年打ち上げを目指して準備が進められている。TeV を超えるエネルギーの宇宙線電子は到達距離が太陽系から 1 kpc 程度に限られるため、起源天体を少数に絞り込める点でユニークな観測になる。また、ガンマ線バーストモニターの搭載も予定されている。

CTA (Cherenkov Telescope Array)は H.E.S.S.²⁴や MAGIC²⁵による大気チェレンコフ望遠鏡による地上からの高エネルギーガンマ線観測の進展を受け、さらなる飛躍を目指すため、全天をカバーするため南半球と北半球に多数の望遠鏡を設置しようとする大型計画である。ヨーロッパの研究機関を中心に企画され、米国と日本も参加予定である。

Tibet AS+MD+YAC は日中共同でチベット高原に設置されている空気シャワー観測装置を拡張し、高エネルギーガンマ線を荷電宇宙線と識別するための MD (Muon Detector array)と、宇宙線の化学組成を識別するための YAC (Yangbajing Air shower Core detector)を建設しようとするものである。

Telescope Array は日米共同で米国ユタ州に展開されている極高エネルギー宇宙線観測実験であり、現在定常的に観測が行われているが、**TALE** (Telescope Array Low energy Extension)と呼ぶ観測エネルギー下限を 10^{17} eV まで下げる計画が進んでおり、さらに第 2 期計画 **TA-phase2** として大気蛍光望遠鏡を大規模に展開し、精度の向上とともに超高エネルギーニュートリノの観測を目指している。

JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory onboard Japanese Experiment Module)は国際宇宙ステーション上に設置を目指す大口径超広視野屈折望遠鏡であり、宇宙からの初めての空気シャワーの観測に挑戦する。極高エネルギー宇宙線の観測例を飛躍的に増やして、荷電粒子による天文学の創始を目指している。また、LHC を超えるエネルギーの物理や超高エネルギーニュートリノ物理、大気内発光現象などの探求にも資する。

²³ 文中の太字は今回のシンポジウムで報告された計画名（あるいはその略称）である。

²⁴ <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/HESS.shtml>

²⁵ <http://wwwmagic.mppmu.mpg.de/>

3-2 . ニュートリノに関する研究計画

GADZOOKS!は Super-Kamiokande の純水に 0.1%のガドリニウムを溶解させ、反電子ニュートリノと陽子との反応を陽電子と中性子の同時計測により同定し、低エネルギー領域の反ニュートリノ研究を行う計画で、現在テストタンクで準備研究が進められている。

HyperKamiokande は、次世代の核子崩壊・ニュートリノ検出器として、SuperKamiokande のさらに十倍以上の検出体積の水チェレンコフ検出器を建設しようとするもので、観測感度の大幅な向上が期待されるのみならず、東海村の加速器 J-PARC からのニュートリノビームを用いて、牧・中川・坂田(MNS)行列に起因するニュートリノにおける CP 対称性の破れを測定することも可能になる。

KamLAND-Zen は、KamLAND タンクの中心にキセノン含有液体シンチレータを設置し、ニュートリノレス二重ベータ崩壊を観測し、ニュートリノ質量を測定する計画で、2011 年に観測が開始される予定である。さらにキセノン量を増やして低エネルギー太陽ニュートリノを観測する **KamLAND2-Zen** や、イメージングデバイスを利用する **KamLANDi-Zen**、Super-Kamiokande を利用する **Super-KamLAND-Zen** も構想されており、超新星残存ニュートリノの検出可能性なども広がる。

南極の氷を利用したチェレンコフ望遠鏡 IceCube は 2012 年に完成する予定であるが、氷中で超高エネルギーニュートリノが起こすシャワーからのチェレンコフ電波パルスを検出する検出器を周辺に付加して、そのニュートリノ検出体積を十倍以上拡大しようとする **IceCube/ARA** (Askaryan Radio Array)の準備が進められている。極高エネルギー宇宙線と宇宙マイクロ波背景放射の衝突によるいわゆる GZK ニュートリノの検出が可能になる。

3-3 . ダークマターに関する研究計画

XMASS (Xenon detector for weakly interacting MASSive particle 他)は液体キセノンシンチレータを用いた多目的実験で、現在岐阜県神岡鉱山の地下に XMASS-I 800kg 検出器が観測を開始し、既存のダークマター実験の数十倍の感度で探索中である。さらに 10 倍の規模の XMASS-II 10ton 検出器が実現すれば、ダークマターだけでなく、太陽ニュートリノで最も重要な低エネルギーの pp ニュートリノや、ニュートリノレス二重ベータ崩壊などの観測も可能になる。

NEWAGE (New generation WIMP search with an advanced gaseous tracker experiment)は、ダークマターの方向検出という異なるアプローチでこの問題に迫ろうとする実験で、ガス飛跡検出器を用いて太陽系の銀河系内での運動により生じるダークマターの「風」を検出し、より明確にダークマターの信号の特徴をとらえることが可能になる。現在の 30 cm角の検出器から大型化・低バックグラウンド化を図る計画である。

3-4．重力波に関する研究計画

LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)は岐阜県神岡鉱山の地下に2010年から建設が始まった基線長3 kmのレーザー干渉計であり、地面振動の少ない地下で、低温技術を利用して熱雑音を低減するなど独自の工夫が施されている。7億光年先で起こる連星中性子星の合体による重力波を検出する能力を持ち、2017年からは本格的な稼働が始まる予定である。

DECIGO (DECI-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory)はLCGTより低い周波数(0.1～10 Hz)帯の重力波の検出を宇宙空間で行う計画である。1,000 km離れた3台の衛星でレーザー干渉計を構成する。この周波数帯域の重力波が検出できれば、宇宙初期のインフレーションを探ることが可能になる。二つの前哨衛星を経て、2027年ごろに打ち上げることを目指している。

3-5．ガンマ線バーストなどに関する研究計画

GUNDAM (Gamma-ray burst for UNravelling Dark Ages Mission)はガンマ線バーストを赤方偏移0.1から20までの全域で観測して、ダークエネルギーの時間変化を観測しようとする計画である。そのPathfinderとして、ガンマ線イメージング検出器と赤方偏移を決定できるような可視光・近赤外線望遠鏡を搭載した衛星を、JAXAの小型科学衛星シリーズを視野に入れて打ち上げることを検討している。

極域での宇宙および地球のガンマ線バースト現象の国際共同観測は、コンプトン散乱の電子飛跡検出が可能なコンプトンカメラ(ETCC)を利用し、観測が困難とされてきたMeV領域で良い方向精度を持つガンマ線観測装置を気球で飛翔させようとするものである。遠方のガンマ線バーストの検出だけでなく、極域で観測を行うことにより、相対論的電子降下による制動放射ガンマ線や雷からのガンマ線も同時に観測しようとする計画である。

SciCR(SciBar detector for Cosmic Ray)は、ニュートリノ実験に使われたシンチレーターバー1万6千本からなるSciBar検出器をメキシコ高山に移設し、太陽中性子などの高感度観測へ転用する計画である。

LHCf(LHC forward experiment)は、LHC加速器の衝突点0度方向に小型電磁力ロリメーターを設置して、宇宙線の空気シャワー生成に重要な超前方粒子生成を測定し、超高エネルギー宇宙線のハドロン相互作用モデルを明らかにする計画である。

「**宇宙線と雲**」実験は、太陽活動の11年周期と雲量が相関しているという報告を受けて、放射線による雲核生成量を実測しようという計画である。

4. 結論に代えて

以上、シンポジウムに取り上げられた計画は広い意味での宇宙線研究として多岐の分野にまたがり、数々の魅力的な研究計画がさまざまな規模で実施中あるいは構想中である事がわかるだろう。現在は、大型低温重力波望遠鏡(LCGT)計画の建設予算の一部が認められる、という大きな進展がみられた直後でもあり、宇宙線研究者会議での次期大型計画の議論は現在再び端緒についた段階である。宇宙線研究者会議は、宇宙線研究に携わる研究者の自主的な連携組織であり、予算配分の機能を持たないながらもコミュニティの意識をまとめていく重要な場として機能している。今後も定期的に将来計画に関わるシンポジウムを行うなどにより、それぞれの計画の科学的意義を常に吟味しながら、準備研究の進行状況を報告し、周辺分野の研究者の理解を得る努力を続け、時間をかけた議論で必要に応じ統廃合も行いながら各種将来計画の優先度を定め、限られた科学研究予算の中でその実現を目指して宇宙線研究者のコンセンサスを形成していく不断の努力が必要である。今後は、大型あるいは中規模計画の実現に向けてさらに議論を絞り込んで行く事になるが、本冊子はその第一段階として有用な資料となれば幸いである。

平成23年6月30日

平成22年度 宇宙線研究者会議実行委員会
将来計画冊子編集ワーキンググループ

伊藤好孝

神田展行

寺沢敏夫

森 正樹

Appendix 1. CRC 将来計画シンポジウム プログラム

日時：2010年9月16日(木) 10:30～17日(金) 15:00

場所：東京大学柏キャンパス 総合研究棟6階(633-635)

| タイトル | 講演者 | 講演+質疑(分) |
|---|----------------------|----------|
| 【9月16日】 | | |
| LCGT | 黒田和明 (東大宇宙線研) | 30 |
| DECIGO | 川村静児 (国立天文台) | 20 |
| XMASS 実験 | 鈴木洋一郎 (東大宇宙線研) | 30 |
| GADZOOKS! | 中畑雅行 (東大宇宙線研) | 20 |
| NEWAGE | 身内賢太郎 (京大理) | 20 |
| カムランドの将来計画 | 井上邦雄 (東北大ニュートリノセンター) | 40 |
| ハイパーカミオカンデ実験構想 | 塩澤真人 (東大宇宙線研) | 20 |
| Cherenkov Telescope Array | 戸谷友則 (京大理) | 40 |
| CALET | 吉田健二 (芝浦工大システム理工) | 30 |
| Tibet AS+MD+YAC Project | 瀧田正人 (東大宇宙線研) | 30 |
| STE 研 CR グループの activity | 伊藤好孝 (名大 STE 研) | 40 |
| 【9月17日】 | | |
| テレスコープアレイ実験 将来計画 (TALE 計画, TA-phase2 計画) | 萩尾彰一 (阪市大理) | 40 |
| JEM-EUSO | 戒崎俊一 (理研) | 30 |
| The IceCube/ARA experiment | 石原安野 (千葉大理) | 30 |
| 極域での宇宙および地球のガンマ線バースト現象の国際共同観測 | 谷森 達 (京大理) | 30 |
| ガンマ線バーストによる初期宇宙観測と暗黒エネルギーの解明 Gamma-ray burst for UNravelling Dark Ages Mission : GUNDAM | 米徳大輔 (金沢大理) | 20 |
| Discussion | | 120 |

Appendix 2. 研究計画一覧表（シンポジウムの発表順）

| 名称 | 目的 | 計画概要 | PI,推進主体 | 予算規模 | 進捗状況 |
|--|---|--|---|--------------------------------|--|
| LCGT | 天体からの重力波の直接検出 | 岐阜県神岡鉱山の地下に3km干渉計を建設 | 梶田隆章、ICRR/KEK/天文台他 | 155億円(98億円は最先端事業で認可) | 2010年度建設開始 |
| DECIGO | 初期宇宙の観測、ダークエネルギーの解明、ダークマターの探索、など重力波天文学の発展 | 0.1Hz-10Hzの重力波を、ドラッグフリー衛星を用いた光共振器型干渉計で観測 | 川村静児(代表)、安東正樹(副代表)、国立天文台、JAXA/ISAS、京大、他、国際協力で行う | 1000億円以上 | DECIGO Pathfinderを小型科学衛星3号機に申請予定、DECIGOは2027年の実現を目指す |
| XMASS | ダークマターの直接検出、0二重ベータ崩壊の観測 | 液体キセノンを用いたシンチレーション検出器を神岡地下に設置 | 鈴木洋一郎、ICRR他 | Phase II 15億円、Phase III 96億円 | Phase 1 建設中 |
| GADZOOKS! | 超新星背景ニュートリノなど | SKに0.1%のGdを溶かして中性子タグし反電子の検出 | 中畑雅行、ICRR/IPMU | SKの改造のため10億円規模 | 200トンタンクによるR&D |
| NEWAGE | ダークマターの直接検出 | 方向に感度を持つ検出器による観測 | 身内賢太郎、京大 | 1億円規模(～2015)、数億円規模(～2020) | 30cm角検出器観測中、60cmへの拡大準備中 |
| KamLAND-Zen, KamLAND 2-Zen, SuperKamLAND-Zen | 原子炉・地球ニュートリノの観測、0二重ベータ崩壊の観測 | 神岡地下における大型シンチレーション検出器による低BG観測 | 井上邦雄、東北大学センター | KL2-Zen 30億円規模、SKL-Zenは250億円規模 | Zenは2011年予定、KL2-Zen 2014年頃 |
| Hyper-Kamiokande | 陽子崩壊、CP位相の測定等ニュートリノ研究 | 100万トン水チェレンコフ検出器を地下に建設 | ICRR、東大、京大他 | 723億円(概算) | サイト調査、設計進行中 |
| CTA | 天体ガンマ線(20GeV-100TeV) | 北半球と南半球にそれぞれ多数の大気チェレンコフ望遠鏡を建設 | 戸谷友則、CTA Japan | 150M€(日本側20-40億円) | 準備段階研究(2010年より) |

| | | | | | |
|-----------------|----------------------------------|--|--|--|---------------------------------------|
| CALET | 宇宙線(電子、陽子・原子核)、天体ガンマ線 | 国際宇宙ステーション・きぼう曝露部に検出器設置 | 鳥居祥二、早大/JAXA 他 | | JAXA-早大共同研究としてプロジェクト化 |
| IceCube/ARA | 超高エネルギー天体ニュートリノ | IceCube の拡張として電波受信機アレイを南極氷中に設置 | Kansas/Maryland/Wisconsin-Madison/Hawaii/Brussel/Chiba 他 | Testbed \$1M, 100km ² array \$20M | Testbed (2010-11) |
| STELab-CR | LHCf、SciCR、宇宙線による雲核生成 | LHC における断面積測定、太陽中性子観測 | 名大 STE 研 | | LHCf: 0.9&7TeV 完了 |
| TALE | >10 ^{16.5} eV 高エネルギー宇宙線 | Tower FD+infill array+8km stereo FD 設置 | Utah/ICRR 他 | 6 億円(日本 1.4 億円) | 旧 HiRes など、一部の FD 装置は既にあり |
| TA-phase 2 | 最高エネルギー宇宙線 | FD ステーション 52 台の設置により 61,000km ² | ICRR 他 | 262 億円(国際分担未定) | TA-phase1 が 2008 年より稼働中 |
| JEM-EUSO | 最高エネルギー宇宙線 | 宇宙ステーション・きぼう曝露部に 2.5m 広角望遠鏡を設置 | 戎崎俊一、Riken/JAXA/ESA/NASA 他 | 約 180 億円(日本の負担分はその 3 分の 1 程度) | 米国テスト予算獲得、ESA ミッション復活、JAXA/Riken 連携協定 |
| Tibet AS+MD+YAC | 天体 TeV ガンマ線、宇宙線組成 | Tibet 空気シャワー装置の拡張 | ICRR/IHEP 他 | 6 億円 | 1/3 の MD 建設中 |
| SMILE | 天体 MeV ガンマ線、GRB、REP ガンマ線 | 電子飛跡検出型コンプトンカメラを飛翔体に搭載して観測 | 谷森達、京大/金沢大/EISCAT | | 2012SMILE-II 観測・極域テスト観測予定 |
| GUNDAM | 遠方 GRB による初期宇宙観測と暗黒エネルギーの解明 | JAXA 小型科学衛星に GRB 検出器と 45 cm 光学望遠鏡を搭載 | 米徳大輔、金沢大/京大 | | 2011-12 年に WG 結成予定 |

時系列で示した一覧表

| | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020以降 |
|------------------|---------|-----------------|----------|-------------------|-------|------|------|------|------|------|----------------------|
| CALET | 開発 | 打ち上げ・運用 | | | | | | | | | |
| CTA | デザイン | プロトタイプ | 建設 | 建設 | 観測 | 観測 | | | | | |
| Tibet AS+MD+YAC | | 建設と一部観測 | | | | | | | | | |
| TALE | 建設 | | 建設 | 観測 | 観測 | | | | | | |
| TA-phase2 | | | 建設 | | | | | | | | |
| JEM-EUSO | | 開発 | | 観測 | | | | | | | |
| GADZOOKS! | R&D | 導入 | | 観測 | | | | | | | |
| HyperKamiokande | | R&D | R&D | 建設 | | | | | | | |
| KamLAND-Zen | 進行中 | | | 観測 | | | | | | | |
| KamLAND2-Zen | | | R&D | | | | | | 観測 | | |
| KamLANDi-Zen | | | | | (TBA) | | | | | | |
| SuperKamLAND-Zen | | | | | (TBA) | | | | | | |
| IceCube/ARA | Phase I | Phase II | Phase II | Phase III | | | | | | | |
| XMASS | Phase I | Phase II建設 | 観測 | Phase III建設 | | | | | | | |
| NEWAGE | | DAMA領域到達 | | DAMA領域完全探索 | | | | | | | |
| LOGT | 建設 | 調整 | | 観測 | | | | | | | |
| DECIGO | | DPF R&D・製作・打ち上げ | | Pre-DECIGO R&D・製作 | | | | | | | 2021打上、2027 DECIGO打上 |
| GUNDAM | | WG結成 | 開発 | 打上 | | | | | | | |
| 極域GRB | | 第1回気球実験 | | | | | | | 定期観測 | | |

Appendix 3. 研究計画サマリー（シンポジウムの発表順）

LCGT プロジェクト

黒田和明（東京大学宇宙線研究所）

平成 22 年 6 月に、最先端研究基盤事業において、大型低温重力波望遠鏡（LCGT）計画の建設費の一部が、3 年の事業計画として予算措置が認められ、平成 22 年 7 月からその実行計画がスタートした。この 3 年の事業計画には、地下トンネルと低温鏡にかかる費用は盛り込まれておらず、平成 23 年度及びその後の概算要求により要求をしていく予定である。

本重力波計画については、従来の LCGT 計画と基本的には変わらず、今回の予算措置で途中に観測フェーズを挿入して学術的成果を上げることが求められている点が新しい点である。また、推進組織の刷新が求められ、プロジェクトのリーダーに宇宙線研究所長の梶田氏が就任し、一昨年のプロジェクトマネージャー新設とあわせて、強力な推進体制となった。

LCGT 計画の目標は、7 億光年先で起こる連星中性子星の合体による重力波を検出することであり、7 億光年先で起こる現象を捉えるためにおのずと重力波に対する感度が規定され（レーザー干渉計の概要設計が決まり）、連星中性子星の合体の特徴的な周波数から、その観測周波数帯域が設定される。連星中性子星合体は、年間数例以上の検出が目標とされる。連星中性子星合体のように明確な重力波源以外にも、複数の種類のターゲットが存在し、観測が開始されれば、新しい現象が観測される可能性も期待できる。

LCGT のハードウェアは、長年にわたる R&D により、信頼性よく実現できるもので設計されており、全体のシステムとしての統合が円滑に進めば、予定通りサイエンスの目的を達成できる。3 年の事業で、レーザー干渉計として動作できる形が整い、初期観測が行われる。その後、干渉計の低温化を行って、2017 年から最終的な LCGT の感度による観測を目指している。観測は 10 年以上に亘って続けられる。

LCGT の最初の観測で重力波が発見されれば、物理の実験装置としての最初の目標は達成されたことになる。以後は、強重力場での一般相対性理論の検証などが重要なテーマとなるが、それと共に重力波源の位置を特定するために海外の同種の観測装置とネットワークを組み、共同観測を推進することで LCGT は天文学の観測装置となる。また、ニュートリノやガンマ線などとの連携も重要になってくる。この観測フェーズにおいて、LCGT が世界で主導的な役割を果たしていくためには、単に天文学の装置として質の高い観測データを出し続けるばかりでなく、さらに高感度化・広帯域化をにらんだ R&D を進めていくことが重要である。

まだ予算化途上ではあるが、これまで LCGT の予算化に向けて支援をして頂いた各方面の方々に心からお礼を申し上げたい。

1. DECIGO とは何か？

スペース重力波アンテナ DECIGO (Deci-hertz Interferometer Gravitational-Wave Observatory) は、0.1 Hz ~ 10 Hz の周波数帯での重力波検出を狙う日本の将来計画である。DECIGO 計画の目的は、さまざまな重力波源からの重力波の頻繁な検出を通して、地上の重力波検出器 LCGT などと創成されるであろう重力波天文学を大きく発展させ、電磁波や宇宙線による天文学と相補的に、またそれらと融和して、宇宙の姿をより深く理解することである。

2. 予備概念設計

DECIGO は 1,000 km 離れた 3 台のドラッグフリー衛星から構成され、重力波によって引き起こされる衛星間の距離のごく微小な変化を、レーザー干渉計を用いて計測するものである。DECIGO においては光共振器を用いることにより、装置の感度を高め、0.1 Hz ~ 10 Hz の周波数帯で、重力波の引き起こすストレインに対して、 $10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$ 程度の感度の実現を目指す。この検出器 4 台を太陽周回、地球トレイル軌道に離して配置することにより（内、2 台は同じ位置）、重力波源の到来方向に対する精度を上げ、また背景重力波検出のための相関解析を行う。

3. 期待されるサイエンス

目標感度が実現できた場合、以下のようなさまざまなサイエンスが期待できる。

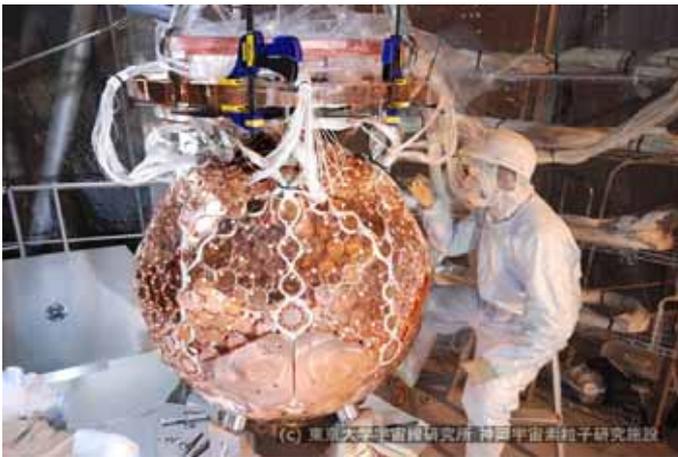
- (1) 宇宙初期からの重力波を検出し、インフレーションの存在を確認し、その性質を探る。
- (2) 遠方の中性子星連星からの重力波の検出により、宇宙の膨張加速度を計測し、ダークエネルギーの謎を解く。
- (3) 中間質量ブラックホール連星からの重力波を検出し、銀河中心の巨大ブラックホール形成のメカニズムを理解する。
- (4) 修正重力理論、特にプランクディック理論に対して、これまでの精度を大きく上回る検証を行う。
- (5) 初期密度揺らぎからの重力波の観測を行い、ダークマターの正体が原始ブラックホールであるかどうかを見極める。
- (6) 年間 10,000 個の中性子星連星からの重力波を検出することにより、中性子星の物理を理解する。

XMASS 実験

鈴木洋一郎（東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設）

XMASS 実験は、液体キセノンを用いて、暗黒物質の探索（ $\sigma_{SI}=10^{-47}\text{cm}^2$ まで）、低エネルギー太陽ニュートリノの観測（1日10事象：pp-ニュートリノ）、2重ベータ崩壊の探索（30 meV まで）を行う宇宙素粒子検出装置である。液体キセノンは優れた蛍光物質であり、1keV あたり約 42 個の真空紫外光を発する。Z は 54 で、密度は約 3 グラムである。したがって、エネルギーの低い外入りのバックグラウンドに対して、コンパクトで高い自己遮蔽能力を持つ。また、液相、気相とうまく使い分けることにより、キセノン中に含まれる不純物を取り除く事が比較的容易である。

フェーズ I として、850 kg（有効質量 100 kg）の暗黒物質探索実験を開始する。目指すバックグラウンドのレベルは、有効質量内で信号領域に 10 日に 1 事象である。この感度に到達すると、現在、到達している実験感度の約 50 倍となり、初めて、SUSY から予想される領域に大きく踏み込むことになる。スピンインデペンデントな反応に対する感度は、100



GeV の WIMPs ダークマターに対して 10^{-45}cm^2 である。2010 年末頃から本格的データの収集開始予定である。

フェーズ II は、有効質量 1 トン（全重量 5 トン）の観測装置で、暗黒物質の研究を継続するとともに、低頻度ではあるが、pp-太陽ニュートリノの観測を目指す。これは、現在のフェーズ I の延長として

行う。もし、フェーズ I で、暗黒物質が見つかっているとすると、季節変動の測定やエネルギースペクトルの測定を行う。平成 24 年度から建設 3 年、総経費 15 億円、ランニングコスト年間 1 億円が見込まれる。

フェーズ III は、暗黒物質探索、低エネルギー太陽ニュートリノ観測に加え、2重ベータ崩壊の探索を目ざすものである。現在、細部はまだ検討中であるが、自己遮蔽があまり有効でない 2 重ベータ崩壊のエネルギー領域において、コンプトン散乱同定法を用いて、バックグラウンドの低減をはかる。測定器の規模としては、有効質量 10 トン程度である。有効質量 10 トンの中に、2重ベータ崩壊を起こす ^{136}Xe が 870 kg あり、検出感度は 30 meV 程度までゆく。Inverted mass hierarchy で予想される領域をほぼ探索することができる。平成 29 年度から建設 3 年で建設経費 96 億円、ランニングコストは年間約 6 億円である。

計画の概要

スーパーカミオカンデ (SK) は 32000 トンの有感度体積と 40%の光電面被覆率を持つ水チェレンコフ型実験装置であり、低エネルギーニュートリノ観測において世界で最も高い感度を持つ。本計画はSKに約0.1%のガドリニウムを溶解させ、反電子ニュートリノと陽子との反応を陽電子と中性子の同時計測により同定し、低エネルギー領域の反ニュートリノ研究をおこなうものである。具体的には、超新星背景ニュートリノの発見、原子炉ニュートリノの高統計観測によるニュートリノ振動パラメータの精密決定、超新星爆発時の方向感度向上等を目指す。本計画を遂行するためには、SKタンクの改修、純水装置システムの更新、100トンの純度の高いガドリニウムの購入等が必要であり、予算規模としては約10億円のプロジェクトである。

科学的な意義

宇宙の始まりから起きてきた超新星爆発からのニュートリノ (超新星背景ニュートリノ (SRN)) を観測することによって、宇宙の星形成の歴史を探ることができる。SRNは10-30 MeV のエネルギー範囲において、他の反電子ニュートリノ源を超えて存在すると予想されているが、未だに観測されていない。観測の障害になっているものは、大気ニュートリノ事象や宇宙線核破砕による現象であるが、これらは反応の際の中性子をタグすることによって除くことができる。SKに0.1%のガドリニウムを溶解させ、中性子を捉えることができれば、10年の観測で5-33事象のSRNを捉えることができる。また、10 MeV以下には原子炉ニュートリノの現象が年間3000イベント期待でき(3 MeVしきい値を仮定)、 m^2_{12} の値を約1%、混合角を約6%の高精度で測定することができる。10 kpcの距離で超新星爆発が起きたとすると約8000事象の反電子ニュートリノと陽子の反応(inverse-beta)と300事象程度の電子散乱事象が期待される。中性子をタグすることによって電子散乱事象を効率よく抜き出すことができ、超新星の方向決定精度をあげることができる。具体的にはタグしない場合が約6度に対して、タグした場合にはその約半分の3度程度(いずれも95%信頼度)まで向上させることができる。また、ベテルギウスぐらい近い星が超新星爆発に至る場合には、爆発の日の2日程前からSi燃焼からのニュートリノによる中性子事象が一日あたり1000イベントぐらい期待され、超新星爆発を予知することができる。

準備状況

200トン容積のテストタンクを作り、本プロジェクトの開発研究を進めている。このタンクはSKを模擬したタンクであり、光電子増倍管も240本取り付け。このテストタンクでは、ガドリニウムを溶解させた水の透過率の評価、ステンレス材料などSKを構成する部材の腐食の有無、ガドリニウムを保持したまま水を循環させる方法の開発等をおこなう。2010年末までにタンク、水循環装置等すべての設備が設置され、2011年度に本格的な試験

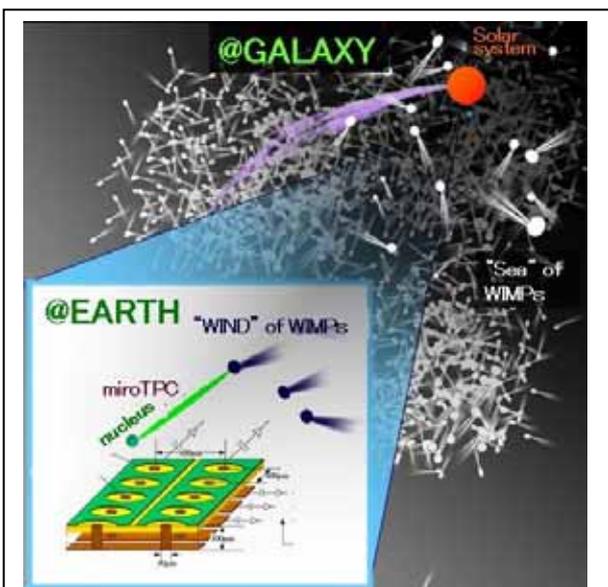
を行う。

タイムスケジュール

2012年3月までに開発研究の結論を出し、ガドリニウムを溶解させることによって他の観測に悪影響を与えることがなければ、正式にSK コラボレーションに提案をする。提案が認められた場合には、最初にSK タンクの改修工事を行い水漏れ箇所の補修を行う(半年から1年)。同時に純水装置システムを更新する。その後、ガドリニウム水を給水し、約10年間観測をおこなう。

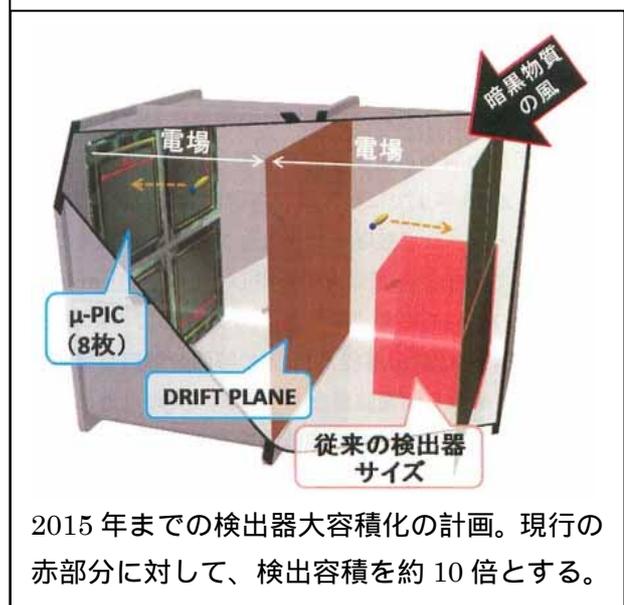
NEWAGE(方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験) 研究代表：京都大学 身内賢太郎

現在、世界中で大質量検出器を用いた暗黒物質探索実験が行われている。これらの実験では、検出事象数もしくはその季節変動を検出根拠とするが、決定力に欠ける。これに対して、太陽系の銀河ハローに対しての相対運動に起因する、方向に感度を持った暗黒物質探索実験は、原子核反跳の方向分布という他にない証拠を得られる為、検出の決め手になると言われてきたが、低圧力ガス中の数 mm の飛跡を検出する検出器が必要であるため、未だに実現されていない。



本研究の概念図。銀河に対してランダムに運動していると考えられている暗黒物質は、太陽系で観測すると「風」の様に感じられる。(右上。)実験室に置いた低圧力(0.1気圧以下)のガスの原子核が暗黒物質に反跳されると前方に散乱される。この散乱方向の角度分布が暗黒物質検出の決め手となる。

日本では、800 kg の液体キセノンを有する XMASS 実験間もなく開始、世界最高感度での暗黒物質探索が期待されている(2010年9月時点)。我々は、XMASS に代表される大質量実験の結果が示唆する暗黒物質の検出を決定づけるべく、独自のガス飛跡検出器「マイクロ TPC」を開発、



2015年までの検出器大容積化の計画。現行の赤部分に対して、検出容積を約10倍とする。

2007年までに地上実験による方向に感度を持つ初の制限を与えた。現在 30 cm 角の TPC を製作、神岡地下実験室で方向に感度を持つ暗黒物質探索を進めるとともに、高感度化、大型化の為に R&D を行っている。2015年までに 60 cm 角検出器を製作、これまでに唯一季節変動観測の主張をしている DAMA 領域の一部に感度を届かせることを目的とする。更に、2020年までにさらなる低バックグラウンド化、読み出し回路の高性能化を進め、1 m 角の検出器を複数開発、他実験の未探索領域の探索を計画している。

カムランドの将来計画

東北大学ニュートリノ科学研究センター 井上邦雄

カムランド実験は、極低放射能環境を実現し、原子炉ニュートリノ振動の精密測定や地球ニュートリノの観測などの成果をあげてきた。

ニュートリノ振動においては、1-2 世代間の振動観測は地理的にユニークな存在であり、また 1-3 世代間振動にもある程度の感度を有することから、継続的な測定による統計誤差の縮小とともに系統誤差の縮小が重要である。Super-KamLAND (4) なら 25% 程度の強度を占める約 80 km の距離にある志賀原発からの信号解析で、1-3 世代間混合角や質量階層構造の識別をできる可能性が有る。

カムランドによって始まった地球ニュートリノ観測は既に 4 以上の有意さになっており、測定誤差はマントルからの寄与程度 (25%) にまで向上している。既に地熱全てを放射性元素起源とするような熱生成モデルを排除し始めており、地球科学的にきわめて重要な知見を与えている。マントルダイナミクスなどの更に踏み込んだ研究のためには統計誤差縮小が不可欠であり、継続的な観測あるいは Super-KamLAND のような大型化が必要である。

太陽ニュートリノ観測では、 ^8B ニュートリノの低エネルギーでの増加や ^7Be の精密測定、 pep/CNO ニュートリノの測定などが課題として残されており、宇宙線起源バックグラウンドの低減や、放射性不純物のさらなる低減が必要である。KamLAND2 (2) での清浄バルーンの導入や KamLANDi (3) での宇宙線起源バックグラウンドの低減が有効である。

さらに、カムランドは極低放射能環境を利用したごく希な現象探索で世界をリードするポテンシャルを有している。液体シンチレータに可溶の ^{136}Xe を使ったニュートリノレス二重崩壊の研究 (^-Zen : Zero Neutrino Double Beta) や CdWO_4 結晶、 CaF_2 (CANDLES) の導入による他核種での二重崩壊研究、DAMA/LIBRA が指摘する暗黒物質季節変動の検証のための NaI 導入などが考えられる。KamLAND-Zen (1) は既に予算化されており、世界最高感度で二重崩壊研究をリードし続けるために KamLAND2-Zen の予算化が切望される。その先も KamLANDi-Zen、Super-KamLAND-Zen と他の手法と比べてコストパ

パフォーマンスに優れた計画が温められている。

1 " KamLAND-Zen " カムランドに 400 kg の ^{136}Xe を導入し、KKDC クレイム・縮退構造を検証する。2011 年観測開始予定である。

2 " KamLAND2(-Zen) " カムランドのエネルギー分解能向上とともに 1000 kg の ^{136}Xe を導入し、逆階層構造を検証する。放射性不純物低減の機会でもある。消防法での内部点検から 2015 年までの開始が必要である。

3 " KamLANDi(-Zen) " イメージングデバイス (被覆率~1%) の導入で、宇宙線起源バックグラウンド (マルチパーテックス) を大幅に低減する。

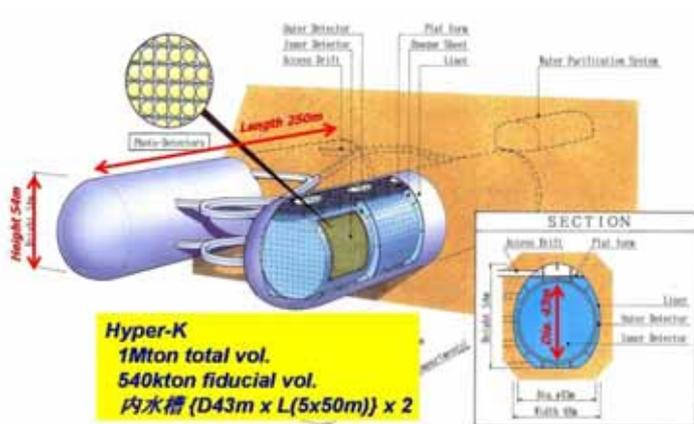
4 " Super-KamLAND(-Zen) " スーパーカミオカンデを液体シンチレータにコンバートする。集光量の向上とイメージングデバイスの導入も実施する。Zen では大部分を純水とし、水圧の高い底部付近に液体シンチレータを導入し、加圧した数十トンの ^{136}Xe を 15wt% の濃度で導入することで、標準階層構造に切り込む感度を得る。

ハイパーカミオカンデ実験構想

東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設 塩澤 真人

1998年のスーパーカミオカンデによるニュートリノ質量と混合の発見を皮切りに、様々な実験によりニュートリノの性質の理解が飛躍的に進展した。これにより、ニュートリノの混合行列の非対角成分の値が大きく、非常に大きな混合である事が明らかになった。これは、クォークのカビボ・小林・益川行列が単位行列に近いことと際立った違いを示す。またニュートリノ振動実験により示唆されるニュートリノ質量は $0.05\text{eV}/c^2$ 程度であるが、他の素粒子（6つのクォークや3つの荷電レプトン）に比較して、6桁以上も小さい。これらニュートリノの特異な性質は背後に隠された未知の原理の存在を示唆しているが、それを解き明かすのが今後の素粒子物理学の最も重要な課題の一つとなる。

クォークとレプトンの性質を統一的に、しかも自然に説明する枠組みとして、素粒子の



大統一理論がある。大統一理論の存在を確認する、また理論の詳細を調べる直接的な方法として、陽子が自発的に崩壊する現象を探索する実験が考えられる。この陽子崩壊探索を目的とした実験として、ハイパーカミオカンデと呼ばれる、100万トンクラスの液体アルゴン実験装置の建設が検討されている。現在

世界最大の検出器であるスーパーカミオカンデの約20倍の大きさとなり、陽子の寿命として10³⁵年程度の感度を持つ。またJPARCからの大強度ニュートリノビームを用いた長基線ニュートリノ振動実験では、ニュートリノの粒子・反粒子対称性の破れ（CPの破れ）の世界初の測定を目指す。他にも大気ニュートリノや太陽ニュートリノ、超新星爆発ニュートリノを用いた、ニュートリノ研究やニュートリノ天文学も行う。すでに候補地である岐阜県飛騨市神岡町の柗洞坑内において岩盤強度や割れ目の調査を行い、測定データを基にした有限要素解析により地下大空洞の実現性を確認している。またコスト低下を目指して、新しい光センサーの開発も進めている。2015年頃の建設開始、2025年頃の実験開始を目標としている。建設コストは超概算で723億円である。国内では別に、10万トンクラスの液体アルゴンを用いた陽子崩壊・ニュートリノ検出器の開発も進行中である。

ガンマ線宇宙物理学は今まさに飛躍的發展の時代を迎えている。 GeV 領域においては、フェルミ衛星が千を超える天体を検出し、一方、地上 TeV ガンマ線観測でも、HESS や MAGIC などの活躍で TeV ガンマ線天文学は今や完全に確立し、創成から發展の時代へと移りつつある。 さらに、GeV 領域ではフェルミ衛星が言わば決定版とも言えるプロジェクトであるのに対し、TeV 領域はまだ發展の余地を大きく残している。

CTA (Cherenkov Telescope Array) は、世界で一つという大規模な TeV ガンマ線望遠鏡群により、現在より一桁以上高い感度と、より広い光子エネルギー領域を達成しようという野心的な計画である。現在ヨーロッパを中心に検討が急速に進んでおり、最近アメリカも合流して、世界で一つの大規模 TeV ガンマ線観測装置の実現に向けて大きく動き始めた。実現すれば、1000 以上の TeV ガンマ線天体の発見が期待され、単にガンマ線のみならず、高エネルギー宇宙物理学全体を大きく牽引することになると期待される。2009 年までにデザイン研究が終了し、2010 年から preparatory phase study がヨーロッパで正式にスタートし、プロトタイプ作成を経て、2014-15 年の本格建設開始を目指している。このような世界情勢の中、日本としてもこの計画に実効的に参加するべく、CTAJapan Collaboration が活動を始めている。既存の国内 TeV ガンマ線コミュニティの枠組みを大きく刷新し、広く日本の高エネルギー宇宙物理学コミュニティに開かれた新しい組織体制として様々な分野、機関の研究者総勢約 50 名が参加し、CTA 計画の中で存在感のある日本グループの参加を目指している。目標は、サイエンス、実験開発、予算など全ての面において CTA 全体の 10-20% 程度の貢献を日本が行うことであり、予算的には CTA 総額の 150 MEuro に対して日本から 20-40 億円を想定している。

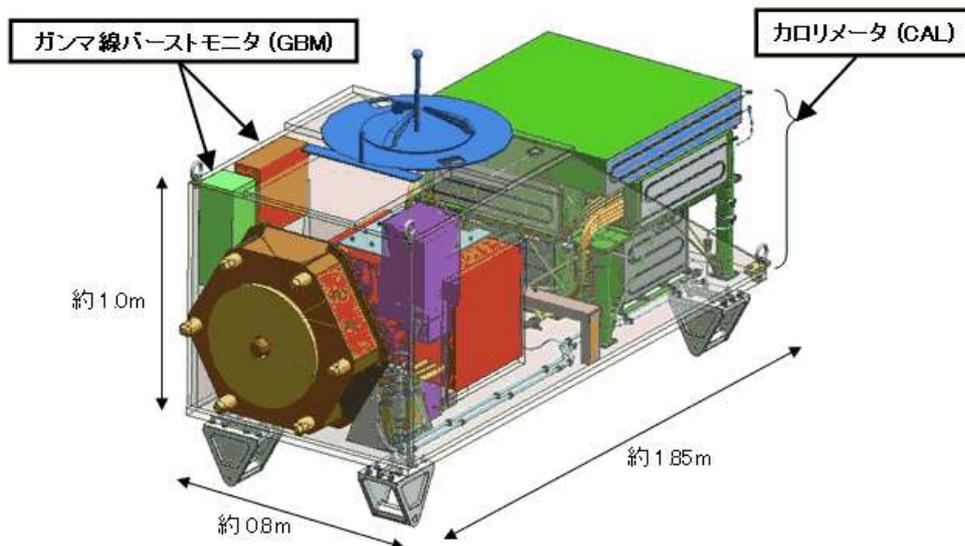
CALET

研究代表者：早稲田大学 鳥居祥二

装置開発： JAXA / 早稲田大学

参加機関：神奈川大学、青山学院大学、横浜国立大学、
芝浦工業大学、東京大学宇宙線研究所など

宇宙における高エネルギー現象の体系的解明と暗黒物質の検出を目的として、国際宇宙ステーション（ISS）の日本実験モジュール「きぼう」船外実験プラットフォームに、高エネルギー電子・ガンマ線観測装置（CALET: CALorimetric Electron Telescope）を設置し観測を行うことを計画している。CALET ミッションは現在、JAXA により開発フェーズへ移行しており、2013 年度の打ち上げを目指して、観測装置の設計、製作、試験を実施した後、ISS において 2 年以上の観測を行う予定となっている。CALET では、高エネルギー電子、ガンマ線等の宇宙線の到来方向およびエネルギーを観測し、宇宙暗黒物質の正体、宇宙から飛来する高エネルギーの電子・陽子・原子核の起源を解明することを目的としているが、観測可能エネルギー帯域が広く、他国の衛星や ISS 搭載の他の実験装置に比べて、これまでにない最高レベルで高エネルギー粒子の選別とエネルギー測定が可能である。TeV 領域におよぶ電子・ガンマ線、ならびに PeV 領域におよぶ陽子・原子核の高精度観測（世界で初めて）を目指す。



- ・質量：500kg 以下
- ・寸法：約 1.85m × 約 1.0m × 約 0.8m
- ・搭載ミッション：カロリメータ(CAL)、ガンマ線バーストモニタ(GBM)

1. プロジェクト名または研究課題

Tibet AS+MD+YAC Project

2. 研究代表者

灌田正人 東京大学宇宙線研究所 takita@icrr.u-tokyo.ac.jp tel:04-7136-5128

3. 参加予定者リスト

チベット AS γ 実験の日中共同研究者約 80 名

4. 計画のあらまし

水チェレンコフ型大型 (約 10,000 m²) 地下ミュオン観測装置 MD の増設を主体とするチベット空気シャワー観測装置 AS (中国チベット自治区の羊八井、高度 4300 m) のアップグレードを行う。未開拓の 100 TeV 領域の宇宙ガンマ線を放射する天体とその加速限界を世界最高感度で観測することにより、Knee エネルギー領域まで加速されている銀河宇宙線の起源と加速機構を研究する。また、チベット高度では Knee 領域前後のエネルギーで最大シャワー発達に達するため、Knee エネルギー前後の一次宇宙線化学組成を小さな系統誤差で観測することが可能となる。チベット空気シャワー観測装置は高地で展開する唯一の大規模空気シャワー装置であり、空気シャワーコア観測装置を増設することにより、古典的ではあるが未解決な重要課題である宇宙線の化学組成問題に取り組む。

5. 予算規模とその実現方法

9 億円、大型科研費もしくは概算要求

ホスト機関：日本側は宇宙線研究所、中国側は高能物理研究所

6. 年次計画

総計 6 年間

最初の 2 年間で大型地下ミュオン観測装置 MD の建設を行い、テスト観測に入る。また、チベット空気シャワー観測装置の拡張と空気シャワーコア観測装置 YAC の建設を行う。残りの 3-4 年間で連続本観測を行う。現在 MD の約 1/3 を部分建設中であるが、全体

計画の残りの予算は今後申請する必要がある。

望遠鏡アレイ実験 将来計画 (TALE 計画, TA-phase2 計画)

提案概要

2010年10月 7日

望遠鏡アレイ実験 日本側共同研究者グループ

将来計画検討担当：荻尾 彰一 (大阪市立大学 大学院理学研究科)

検出面積 700km^2 の Surface Detector (SD) アレイと 38 台の Fluorescence Detectors (FDs) からなる望遠鏡アレイ・フェーズ 1 (TA-phase1) 実験は 2003 年に科研費・特定領域研究に採択されて建設開始され、2008 年から定常観測を続けており、極高エネルギー宇宙線の起源と伝播について統一的描像を提示しつつある。また、この実験の我々日本側グループはこれまで未経験であった「FD の製作・運用・較正・データ解析」のすべての技術を習得した。この状況に到達したことを踏まえて、我々は短期的および中期的な 2 つの将来計画を提案する。

その第 1 は、短期的将来計画 Telescope Array Low energy Extension (TALE) である。TA-phase1 に高仰角 FD15 台と高密度配置空気シャワーアレイ (SD ~ 100 台) を追加配置することによってハイブリッド感度を 10^{17}eV まで下げる計画で、米国共同研究者側はすでに一部の予算を獲得して計画を具体的に進めつつある。

そして第 2 は、極高エネルギー宇宙線の観測による粒子線天文学の確立、極高エネルギー粒子ビームを用いた宇宙空間の物理学的測定と原子核相互作用の研究を主目的に、有効検出面積を現行の TA-phase1 の約 10 倍に拡大する望遠鏡アレイ・フェーズ 2 (TA-phase2) である。この計画では、 0.5° に達する優れた角度分解能、縦方向発達の測定による高いエネルギー決定精度と粒子種判別能力、極高エネルギーニュートリノに対する有意な感度など、今後の極高エネルギー宇宙線観測で必要となる「高精度」「対ニュートリノ高感度」を実現するために TA-phase1 の感度を、SD アレイではなく、Stereoscopic FD アレイによって拡大する。具体的には、1747 台の FD を 55 か所の FD ステーションに配置する。ステーション間隔を 40 km とすると、全体での面積は 61000km^2 となる。FD 合成鏡の面積化と PMT の高感度化によって、このステーション間隔で 10^{19}eV 以上の空気シャワーに対してステレオ検出効率 ~ 100% を達成する。晴天・月のない夜間に限るという duty factor を 10% とすれば、有効検出面積は 6100km^2 で、これは AGASA $\times 61$ 、TA-SD $\times 9$ 、Auger-South $\times 2$ に相当し、世界最大の検出面積であり、かつ世界最高のエネルギー・到来方向の分解能を有する。TA-phase2 の建設に必要な経費は 260 億円と見込まれる。本計画は新規の R&D なしに直ちに実施可能であり、TA-phase1 終了直後から建設を開始し、2015 年からの運用開始見込んでいる。

JEM-EUSO ミッション

戎崎俊一（理化学研究所）

地球を見下ろす「地文台」とも言うべき次世代観測施設を開発して、国際宇宙ステーション(ISS)に設置し、宇宙の最高のエネルギーの源と発生機構を探索し、宇宙の基本的相互作用の限界を観測する。現在までに観測された宇宙線粒子の最高エネルギーは、加速器で到達できる最高エネルギー（約 10^{13} eV）をはるかに超えて 10^{20} eV に達している。このような極限エネルギー宇宙線がどこで生じどのようにして加速されたか、そのエネルギーに限界があるのか否かは、現代物理学の大きな謎である。

JEM-EUSO は、宇宙から空気シャワーの観測という新しい観測手法の開拓に挑戦する。地上施設ではこれ以上の観測領域の拡大が困難であり、宇宙からの次世代観測装置による観測領域の飛躍的拡大が強く求められている。

JEM-EUSO は、極限エネルギー（ 10^{19} eV $< E < 10^{21}$ eV）粒子を用いた新天文学を始めることを基本目的としている。それは、この宇宙で最高のエネルギーを持った粒子の起源と発生機構を探索することである。極限エネルギー粒子は、銀河磁場によって数度以下しか曲げられずにほぼ真直ぐに地球に到達するため、その到来方向から起源天体を直接特定できる。到来方向解析によって得られる小規模（クラスタ：10 度以下）、中規模（10 度以上 60 度以下）、大規模（大局成分：60 度以上）の異方性を検出することで、極限エネルギー粒子の起源についての制限が得られる。特に中規模と大規模の異方性の正確で頑健な議論には、JEM-EUSO のみが実現する全天にわたるほぼ一様な露出が肝要である。ミッション運用の最初の 3 年ですでに 5.5×10^{19} eV 以上のエネルギーを持つ粒子による大気中での反応事例を 500 例以上検出し、到来方向解析による起源天体特定の臨界量に至る。

起源天体が点源の場合には、それを数個以上のクラスタとして、既知の天体に同定する。この空間的に分離された起源天体のスペクトルの違いおよび同定天体の性質を比較して議論することにより、発生機構とエネルギー源を明らかにする。また、Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK) 機構によるスペクトル構造の距離依存性を確認して、その存在の最終確認を行う。これは高ローレンツ因子（ $\sim 10^{11}$ ）の極限におけるローレンツ不変性の初めての検証となる。ローレンツ不変性は自発的対称性のやぶれを通して時空を形づくっている基本粒子の相互作用と直接関係している。同一天体から得られるエネルギースペクトルの GZK 構造は、全天を積分した様々な距離の天体からの寄与が混ざったものに比べると格段に鮮明で、理論モデルとの精密な比較を可能とする。それは、この極限エネルギー領域において、初めての絶対エネルギー較正を与える。

JEM-EUSO が搭載される国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」は、2009 年 7 月に完成し、曝露部ミッション、与圧部実験が開始され、さまざまな成果が報告されている。2010 年 8 月には、宇宙開発戦略本部が 2016 年以降の宇宙ステーション運用延長を決定した。また、膨大な投資をして実現した国家的な基盤施設である「きぼう」を活用する体制を強化するために、理研と JAXA の間で、連携協力協定が締結され（2010 年 5 月 12 日）

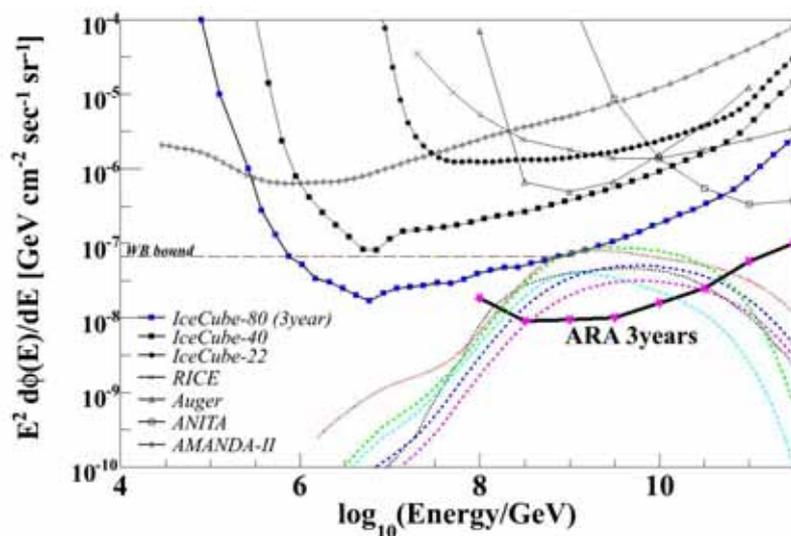
連絡協議会が組織された。欧州においては、European Space Agency、(ESA) の Fundamental Physics Roadmap Team、Astronomy Working Group、そして European Science Foundation で高い評価を得、ESA における宇宙ステーション研究の ELIPSE プログラムに採用され、欧州各国における予算獲得の動きが本格化している。米国においては、米国担当分を 2010 年 11 月 1 日に開始される SALMON 公募に応募する予定である。

IceCube/ARA 実験

千葉大理 石原安野

IceCube 実験は南極深氷河にチェレンコフ光検出器を、1 立方 Km にわたって配置し、数百 GeV を超えるエネルギーの高エネルギー宇宙ニュートリノを検出するニュートリノ望遠鏡である。2005 年から開始された建設は 2010 年現在約 9 割の検出器が埋設され稼働中であり、2011 年初頭に完成予定である。IceCube は日本、アメリカ、欧州、ニュージーランドの計 7 カ国からなる国際共同プロジェクトであり、約 250 人規模の Collaboration で進められている。

IceCube の主要な観測エネルギー帯域は TeV から PeV であるが、EeV を越える極高エネルギー領域においても世界最良の感度を有している。この領域では、 10^{20} eV を越える最高エネルギー宇宙線由来のニュートリノが存在することが期待されている。特に宇宙背景輻射との衝突、いわゆる GZK 機構、によって生成されたニュートリノは、その存在が確実視されるばかりでなく、その流量や異方性は長年の宇宙物理学上の問題である最高エネルギー宇宙線の起源解明に直結する情報となるため、IceCube 実験においても、その検出を目指してきた。日本グループの主導で実施されてきた解析により、完成時の約半数の検出器が稼働した 2008-2009 年におけるサイエンスランでは、GZK ニュートリノ 事象が 0.5-1 イベント期待される感度を実現し、 10^{17} eV - 10^{19} eV 領域で最も厳しいニュートリノ流量上限値をつけている。この結果から、2011 年に開始される IceCube 完全稼働時における感度を評価することができ、2012 年 5 月までに少なくとも 1 例以上の GZK ニュートリノ事象を検出できる見込みである。



ける感度を評価することができ、2012 年 5 月までに少なくとも 1 例以上の GZK ニュートリノ事象を検出できる見込みである。

IceCube 実験で GZK ニュートリノ事象数例の観測が 5 年

以内に期待できる状況である現在、検出事象の統計を上げ GZK ニュートリノの絶対量を実験的に確定するために、特に EeV 領域以上で IceCube の一桁上の観測有効面積を実現する IceCube の超高エネルギー領域拡張実験は極めて意義の高いものである。ARA 実験 (Askaryan Radio Array) は、IceCube 装置に隣接する北西のエリアに、80 km² にわたって電波検出器を 200m の深さに埋設し、チェレンコフ放射の電波領域の極限である Askaryan 効果によってニュートリノ-核子衝突から生じる電波を検出するプロジェクトである。左図に示すように、ARA の感度は 300 PeV 以上で IceCube に比して更に一桁改善され、GZK ニュートリノを数年の観測で数十例検出できる。IceCube 実験グループの一部、及び ニュートリノ電波観測でパイオニアとして実験技術を開拓してきた ANITA 及び RICE 実験グループが集まり、2010 年 3 月に Collaboration が結成された。アメリカで \$2M の R&D 予算がつき、技術実証を主要目標とする phase-I の計画が 2010-2012 の 3 年間で実施される。

ARA 実験の本予算は現在約 \$10M と見積もられている。日本グループは IceCube において GZK ニュートリノ探索を先導してきた実績を生か IceCube との同期事象解析を主導すると共に、ハードウェアでは GPS を用いた 電波検出器間の信号同期と関連する slow control、WiFi を用いたデータ伝送、及び電波検出器利得応答のキャリブレーションを担当する予定である。日本から拠出する予算は全予算の約 30%に当る 3 億円程度を考慮中である。

極域での宇宙および地球のガンマ線バースト現象の国際共同観測

谷森達 (京都大学理学研究科)

京大宇宙線グループは、未開拓な MeV ガンマ線領域の全天探査を目指して、コンプトン散乱の電子飛跡検出が可能なコンプトンカメラ (ETCC) を開発し、2006 年に気球に搭載し、大気および宇宙拡散ガンマ線を 100keV-1MeV の範囲で測定することに成功した (SMILE-I)。現在、天体からの 線検出を目的とした 30cm 角 ETCC を製作し (3 時間のカニ星雲の観測で 5 程度の感度を予定)、まずは国内での気球実験を計画中であるが (SMILE-II) 昨年、北極の上層大気をレーダーで観測する、EU を中心とした国際共同実験 EISCAT グループから、極地域で相対論的電子降下 (Relativistic electron precipitation; REP) による大気中の 線バーストのイメージング測定の共同観測提案を受け、最近、EISCAT の国内実験グループである国立極地研、名古屋大 STE 研、さらには 2012 年打ち上げ予定の地球プラズマ探査衛星 ERG との共同観測も視野にいれ、JAXA、京大生存圏研、また、雷観測の観点から北海道大と、高層大気、地球プラズマの研究者との共同実験を協議し、ワーキンググループを立ち上げつつある。この REP などの大気への高エネルギー荷電粒子振り込みは、上層大気でのイオン化現象の鍵であり、地球規模での大気循環、オゾン層形成、雲の形成など重要な問題の基礎となる測定であり、地球科学で

は大変注目されながら、手法が手薄な分野である。我々が開発した ETCC は、視野が広く、100 keV-数 MeV の間でイメージング検出が可能のため、宇宙からのガンマ線観測と同時に、上空からの REP による制動放射ガンマ線や、雷からのガンマ線も同時に観測ができる。特に極地で気球は、単独の衛星では不可能な定点観測が可能となり、このような不定期な現象の頻度および位置決定には不可欠な実験となる。また極地では周回観測も可能なため、測定時間が 10 時間から一週間と長期に拡張でき、気球でも十分な精度での観測が可能となり、宇宙、地球科学どちらにも有意義なデータが供給可能となる。特に 2012 年からは太陽活動極大期に対応し、ERG 衛星（小型衛星 2 号機に予定）によるバンアレン帯でのプラズマや相対論的電子の観測が行われ、その加速電子の落下点である北極での REP ガンマ線観測は粒子加速を定量的に解き明かす絶好のチャンスとなり、宇宙線物理の根幹にもかかわってくる。打上げを予定しているスウェーデン・キルナからは、3 トンの大型気球放球も可能であり、ガンマ線カメラの衛星搭載規模装置（50 cm 角 ETCC、30 cm 角 ETCC の 10 倍程度の感度）での観測や、他の観測装置（例えば、偏光 X 線観測装置や光学、電波などのプラズマ観測装置）と相乗りの打上げも可能である。これを 5 年程度定期的に行うことで、衛星への確実な技術開発を並行して行う。また同時に、宇宙および宇宙線物理関係では、この ETCC を用いたサブ MeV ガンマ線による最遠方 GRB ($z>10$) の検出可能性の検討（米徳氏提案の検証観測でもある）0.1-50MeV というワイドバンドな広域ガンマ線サーベイを行い、宇宙線起源問題に大変重要だがデータが全くない 10 - 100 MeV 領域の開拓を行う。

具体的には現在、京大宇宙線研究室が遂行している基盤研究(S)(H21~25 年度)を中心に、第一回目の気球実験を進め、2, 3 年後に新領域などの大型競争資金で、地球物理、天文と宇宙線の融合分野で、地球と宇宙でのバースト現象解明を目的として計画を立ち上げる。その後、北極での観測の継続性を維持するため、関連機関からの概算要求の可能性を考えたい。規模は 5 年間で 10-20 億円程度である。これらの成果を見ながら、複数衛星による地球、宇宙の常時ガンマ線バースト観測の可能性を探っていく。

予定しているグループ構成（検討段階であり、8 月中に大体の目処を立てます）。

提案組織 京大理 物理第 2 宇宙線研究室ガンマ線グループ（谷森、窪、身内）

参加検討組織

・地球物理関係

欧州： EISCAT グループ（スウェーデン宇宙科学研究所など）

日本： 国立極地研究所、名古屋大 STE 研、北海道大理学研究科、JAXA、

京大生存圏研

・宇宙線・天文関係

GRB 将来計画 WG(金沢大学理など、米徳氏の提案観測です)

ガンマ線バーストによる初期宇宙観測と暗黒エネルギーの解明

「Gamma-ray burst for UNravelling Dark Ages Mission : GUNDAM」の提案

米徳大輔（金沢大学）、ガンマ線バースト宇宙論プロジェクト

金沢大学・京都大学・名古屋大学を中心とするグループは、ガンマ線バースト宇宙論プロジェクトを組織し、宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バースト(GRB)を用いた初期宇宙観測ミッションを検討している。これまでに確認されている最も遠い天体は GRB で、2009年4月23日に発生した GRB 090423 は赤方偏移 $z=8.2$ (130 億光年) という記録を持っている。GRB の突発的ガンマ線放射は非常に明るく、赤方偏移 $z=20$ で爆発しても十分に観測できるというのが GRB コミュニティの共通認識である。

宇宙の第一世代星は大質量星なので、その崩壊時に GRB を発生させると考えられるため、はじめて第一世代星の観測に手が届く可能性がある。赤方偏移 $z>10$ における星形成歴、宇宙再電離や重元素合成などは現代宇宙論における最重要課題である。また GRB は、CRC の将来計画として議論されている最高エネルギー宇宙線、ニュートリノ、TeV ガンマ線、重力波の起源としても重要となってくる。

また、我々は独自に発見した $E_{\text{peak}}\text{--}L_{\text{uinosity}}$ 関係を「距離はしご」として応用し、世界で初めて $z>2$ の領域でのハッブル図を作り上げた。同時に、 $z>2$ の初期宇宙における宇宙論パラメータ(Ω_m, Ω_Λ)を測定し、宇宙背景放射や Ia 型超新星の結果と誤差の範囲で一致しているという結果が得られている。暗黒エネルギーの性質の中で最も基本的で重要なものが「時間変化」である。Ia 型超新星を数多く観測する WFIRST と呼ばれるミッションでは、赤方偏移 $z<2$ が観測範囲であるため、暗黒エネルギーの存在を明確にできても、その物理的な性質を解明することは不可能だろう。現在のところ、暗黒エネルギーの時間変化を観測できる可能性がある天体は、唯一 GRB だけであり、それを $z=0.1$ から 20 の宇宙全域を観測できる GRB で解き明かそうという計画である。ここでは、前段階として小型得科学衛星シリーズを視野に入れた検討「GUNDAM-PATHFINDER」について紹介する。

GRB で初期宇宙を観測し、さらに GRB 宇宙論を展開するために、(1)高感度のガンマ線イメージング検出器と (2)赤方偏移を決定できるような可視光・近赤外望遠鏡、を搭載した人工衛星を検討している。

(1) に関しては、混入 X 線天体や宇宙背景 X 線の光子数が少ない 100 keV から 100 MeV 帯域で、超広視野コンプトンカメラを用いて 100 秒程度のイメージトリガーを掛ける方法や、視野を 1 str 程度に限るが、1 分角程度の精度で方向を決定するコーデッドマスク型の X 線イメージセン

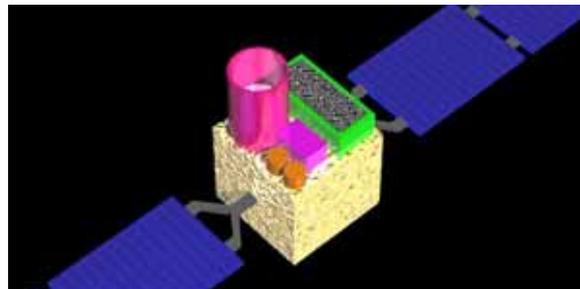


図 1. GUNDAM-PATHFINDER の概念図。GRB の方向を決定し、近赤外線望遠鏡で追観測する。

サーを検討している。

Swift 衛星のように GRB の検出後すぐに向きを変え、追観測を行う。コンプトンカメラでは硬 X 線の偏光観測も実現できると見積もっている。

(2)に関しては 45 cm 程度の望遠鏡の焦点面に、多色同時測光のできる可視光 + 近赤外線カメラを設置し、Ly γ 端を検出することで赤方偏移を決定する。高赤方偏移 ($z > 7$ など) の場合は、すばる望遠鏡、TMT (30 m 望遠鏡) や SPICA (赤外線衛星)、そして ALMA など迅速に追観測し、 $z=13$ までの中性水素量や重元

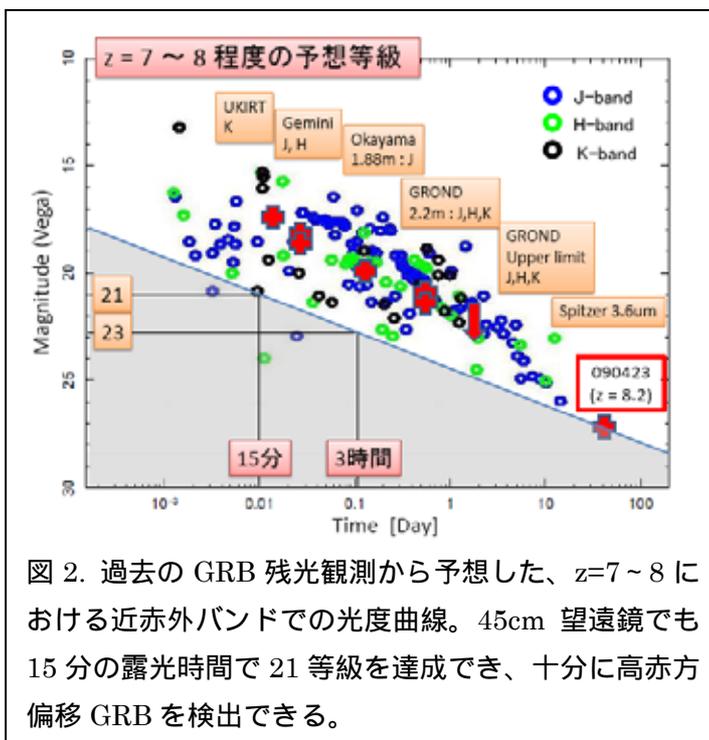


図 2. 過去の GRB 残光観測から予想した、 $z=7\sim 8$ における近赤外バンドでの光度曲線。45cm 望遠鏡でも 15 分の露光時間で 21 等級を達成でき、十分に高赤方偏移 GRB を検出できる。

素量などを測定することで、宇宙再電離や重元素合成の歴史について解明できるだろう。

望遠鏡は放射冷却で 200 K 程度まで冷却し、赤外線センサーは多段ペルチェで冷却する。小型衛星では 1.7 μm よりも短い波長帯に絞り、赤方偏移 $z=13$ までをターゲットとする。45 cm の近赤外線望遠鏡で 2 秒角の回折限界を達成し、1 ピクセルが 1 秒角程度の視野をカバーする赤外線センサーで観測できれば、15 分の露光で 21 等級が達成可能である。

図 2 には、これまでに観測された GRB 残光の光度曲線を参考に、 $z=7\sim 8$ に存在する場合の予想等級を見積もった図である。GRB 検出後、数分で衛星の向きを変えられれば、非常にたくさんの高赤方偏移 GRB を検出できると予想している。GRB090423 ($z=8.2$) も十分に検出できる能力となるだろう。

2011~12 年度に GUNDAM ワーキンググループを正式に立ち上げることを目標としている。本提案のような人工衛星計画は、宇宙科学研究所等の予算で遂行すべき計画であるため、CRC コミュニティに対する予算申請は考えていない。我々は CRC のみなさまにも、本ミッションの内容と初期宇宙観測の面白さを御理解いただき、「宇宙線分野の科学発展にとっても重要である」と応援していただければ幸いである。本講演では、小型衛星シリーズでの実現の可能性(GUNDAM-PATHFINDER: 10~20 億円程度)に念頭を置いた検出器構成と、その能力についての講演を行った。小型衛星であっても $z > 10$ を超える GRB を観測できた場合は、本計画のような「GRB 検出器 + 近赤外線望遠鏡」の有効性を示す事ができ、次の大型計画「GUNDAM」へと発展させることができるだろう。そして、独自の GRB 宇宙論を展開し、暗黒エネルギーの解明を目指していきたい。

予定しているグループ構成

提案組織 金沢大学 (米徳大輔、村上敏夫)

京都大学 (谷森達、黒澤俊介、筒井亮、中村卓史、井上進)

名古屋大学 (高橋慶太郎)

参加検討組織

山形大学 (郡司修一)

東北大学 (沖田博文)

宇宙科学研究所 (大野雅功、松浦周二、坂井真一郎)

高エネ研 (井岡邦仁、水田晃、川中宣太)

京都大学 (戸谷友則)

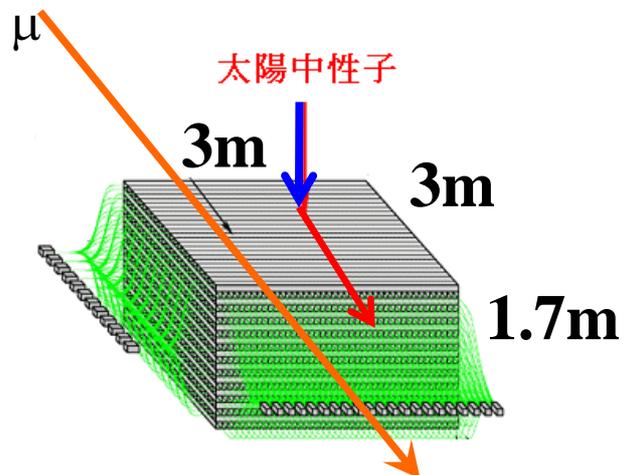
東京大学 (中島正裕)

SciCR 実験

研究代表者：松原豊 (名大 STE 研)

参加機関：名大 STE 研、信州大、メキシコ自治大、他

太陽表面は地球に最も近い宇宙線加速源であり、衛星や地上観測により粒子加速現場の磁場やプラズマの形状などの様々な情報を in-situ に実測できる宇宙線加速の雛形として重要な意味を持っている。また、太陽フレア等に伴う太陽宇宙線のバーストは衛星等の宇宙環境利用に深刻な影響を与えるため、この発生メカニズムの理解や予測は、これからの宇宙環境利用の時代に必須となる。名古屋大学太陽地球環境研究所では、90年代から世界各経度の低緯度高山に、太陽フレアに伴って発生する太陽中性子バーストを捕らえる太陽中性子望遠鏡観測網を整備してきた。太陽中性子望遠鏡は太陽中性子による反跳陽子の飛跡を検出する原理であるが、中性子標的部と反跳陽子トラック部が分離しバックグラウンド除去能力も低い問題点があった。これらの問題点を解決する試みとして、シンチレーターホドスコープを積み上げ



たフルアクティブ太陽中性子望遠鏡が提案されてきた。SciCR 実験は、ニュートリノ検出器として建設され、現在 SciBooNe 実験のため Fermilab に移設された SciBar 検出器を、メキシコにある高度 4700 m のシエラネグラ山頂に移設し、フルアクティブ太陽中性子望遠鏡として転用する計画である。

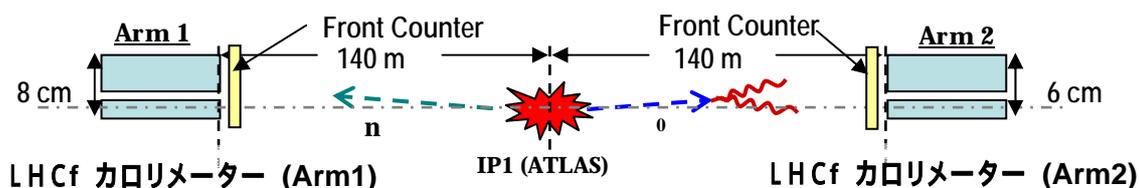
SciBar 検出器は 2.6 cm × 1.3 cm 断面の 3m 長プラスチックシンチレーター15000 本を 64 層 X-Y64 層に積んだフルアクティブ検出器で、太陽中性子をイベントごとに捉えてガンマ線やミュオンなどのバックグラウンドをほぼ完全に落とすことが出来、またエネルギー分解能、方向精度も格段に向上する。一方、信州大を中心にミュオン望遠鏡ネットワークの整備が進んでいるが、本検出器は同時にミュオン望遠鏡としても使用され、これまで測定器の無かった中米領域をカバーするものとして期待されている。2011 年より移設作業を開始し、次期太陽活動極大期と予想される 2014 年頃からの本格観測を予定している。

LHCf 実験

研究代表者：村木綏（甲南大）

参加機関：名大 STE 研、早稲田大、神奈川大、甲南大、芝浦工大、フィレンチェ大、CERN 他

10^{20} eV にも至る超高エネルギー宇宙線の存在は、その生成過程、伝播を含め大きな謎を含んでいる。昨今の AUGER、TA といった最高エネルギー宇宙線の観測の発展によりエネルギースペクトルが明らかにされつつあるが、エネルギースケールや化学組成の解釈については混沌とした状況が続いている。結果の解釈は、観測手段である空気シ



シャワー現象の正確な理解が必要であり、超高エネルギー及び超前方領域での原子核反応を記述するハドロン反応モデルに依存する。これらには QGSJET, DPMJET, SYBILL, EPOS など様々モデルがあるが、超高エネルギーでの実験データの不在によりモデルの適用限界やその不定性が大きな問題であった。2009 年より Large Hadron Collider (LHC) が稼動を始め、 10^{17} eV の宇宙線が起こすハドロン反応を実験的に検証できる時代になった。LHCf 実験は、LHC 衝突点の 0 度方向に専用の電磁カロリメーターを設置し、空気シャワーの理解に不可欠な超前方領域でのガンマ線、 π^0 、中性子生成の測定を目的とした、宇宙線のための LHC 6 番目の正式実験である。2010 年には重心系 0.9 TeV 及び 7 TeV でのデータ取得を終えている。将来計画として、重心系 10 TeV~14 TeV での測定や、原子核 原子核、あるいは陽子 原子核衝突でのデータ取得が予定され、これに向けた測定器のアップグレードが計画されている。これら空気シャワーに重要な LHC エネルギーでの超前方散乱や原子核効果の研究はハドロン物理学の観点からも興味深く、宇宙線研究者とハドロン研究者とのコラボレーションも始まっている。

宇宙線による雲核生成実験

研究代表者：増田公明（名大 STE 研）

参加機関：名大 STE 研、JAMSTEC

地球の気候変動が太陽活動の変動と相関していることは従来から指摘されており、両者をつなぐメカニズムとして、太陽全放射（主に可視・赤外光）の直接影響、太陽紫外光や太陽高エネルギー粒子による上層大気の化学反応、銀河宇宙線による雲核生成の促進等が、提案されている。1997 年以来、Svensmark らにより、雲生成、特に高度 3.2 km 以下の低層雲の量が、太陽活動そのものではなく、銀河宇宙線強度の変動と強い相関を持っていることが示された。宇宙線のつくるイオンが雲生成に関わっているとすれば、気候変動とも相関があることになる。しかし宇宙線が雲の成長を促進する定量的なメカニズムは明らかになっておらず、理論、実験の両面からその検証が必要である。本研究は、地球上の実際の大気組成とほぼ同等の混合ガスに対してその成分比を変えながら、いろいろな種類の放射線粒子を加速器や放射性同位元素を用いて照射し、雲核のもとであるエアロゾルが生成される条件や生成量を明らかにし、さらに雲生成シミュレーションとも共同研究を行うことで、宇宙線強度と相関がある太陽活動と地球気候の関係を結ぶメカニズムの解明をめざしている。

