

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。

平成24年度宇宙線研究所共同利用研究成果発表会報告	正健	1
	雅樹	9
精密観測で迫る弦理論的宇宙論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	大介	17
人事異動	•••••	20

# 研究紹介 平成24年度宇宙線研究所共同利用研究成果発表会報告 大橋正健 【宇宙線研究所】

平成23年度の共同利用研究成果発表会が、平成24 年12月7日(金)と8日(土)の2日間にわたって柏図 書館メディアホールで開催された。本発表会は宇宙 線研究所の共同利用研究として採択された研究課題 の成果報告の場であり、発表内容の多様性は研究所 の共同研究の幅広さを示している。今年度は45件の 成果発表講演があり、また、共同利用研究運営委員 会の西嶋委員長から研究会開催に関する採択課題4 件の報告もまとめて行われた。発表会はおよそ70 名の参加を得て盛況であった。以下に発表会のプロ グラムを、各講演者からご提出いただいた講演概要 と共に記す。なお、発表資料は以下のウェブサイト に掲載されており、詳細はそちらを参照されたい。 http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/infomation/workshop/2012/ kyodoriyo/interuniversity\_2012.html

# 平成24年度共同利用研究成果発表会プログラム

日時:12月7日(金)10:00-17:00 8日(土)09:00-14:20 場所:東京大学柏キャンパス 柏図書館メディアホール 12月7日(金)

開始時間	講演時間	講	演	者		講	演	題	目	
10:00	5分	西山	鳥 オ	志 司	開会の挨拶					

開始時間	講演時間	講 演 者	講 演 題 目
10:05	20分	川 村 静 児 (宇宙線研究所)	KAGRA の R&D および建設と観測
10:25	10分	廣 瀬 榮 一 (宇宙線研究所)	重力波検出器用鏡のコーティングの低温 Q 値測定
10:35	10分	三代木 伸 二 (宇宙線研究所)	計算機を使った干渉計リアルタイム制御
10:45	10分	佐々木 真 人 (宇宙線研究所)	全天監視高精度宇宙線望遠鏡 Ashra 観測
10:55	10分	小川 (東邦大学)	Ashra 観測のための撮像パイプラインの試験と設置
11:05	10分	大 橋 英 雄 (東京海洋大学)	環境中に放出された放射能に関する研究
11:15	10分	<ul><li>櫻 井 敬 久</li><li>(山形大学)</li></ul>	Be-7などによる宇宙線強度時間変化の検出
11:25	10分	福 岡 孝 昭 (立正大学)	南極隕石・宇宙塵の化学的研究
11:35	10分	宮 原 ひろ子 (宇宙線研究所)	宇宙線起源核種および安定同位体分析による太陽活動・宇宙線・気候 変動についての研究 / 宇宙線が雲粒の成長に及ぼす影響に関する研究
11:45	15分	石 原 安 野 (千葉大学)	IceCube 実験の最新成果
12:00	60分		休憩
13:00	20分	<ul><li>奥村公宏</li><li>(宇宙線研究所)</li></ul>	スーパーカミオカンデ(大気ニュートリノ、陽子崩壊等)
13:20	20分	樹 林 敦 子 (岡山大学)	スーパーカミオカンデ(太陽ニュートリノ、超新星ニュートリノ等)
13:40	10分	中 山 祥 英 (宇宙線研究所)	T2K 実験
13:50	15分	西 村 康 宏 (宇宙線研究所)	100万トン水チェレンコフ検出器(ハイパーカミオカンデ)の開発研究
14:05	10分	田 阪 茂 樹 (岐阜大学)	極低濃度ラドン測定システムの開発
14:15	10分	荒 木 英一郎 (海洋研究開発機構)	神岡鉱山における歪・傾斜・地震計測
14:25	10分	飯 本 武 志 (東京大学)	地下環境におけるラドン族の空間的分布の解析と線量評価に関する研 究
14:35	10分	加納 靖 之 (京都大学)	跡津川断層周辺での地殻活動定常観測点の高性能化
14:45	25分		休憩
15:10	20分	岸 本 康 宏 (宇宙線研究所)	液体キセノン検出器を用いた暗黒物質探索
15:30	10分	竹 内 康 雄 (神戸大学)	高純度ガス用のラドン濃度測定器の開発
15:40	10分	身 内 賢太朗 (神戸大学)	ガス飛跡検出器による方向に感度を持つ暗黒物質探索

開始時間	講演時間	講 演 者	講 演 題 目
15:50	10分	中 村 正 吾 (横浜国立大学)	液体キセノンのシンチレーションの減衰時間の研究
16:00	10分	吉 田 斉 (大阪大学)	48Ca の二重ベータ崩壊の研究
16 : 10	10分	斎 藤 嘉 彦 (東京工業大学)	MITSuME(爆発変動天体の多色撮像観測)プロジェクト
16 : 20	10分	小 島 浩 司 (愛知工業大学)	大型ミューオンテレスコープによる銀河宇宙線強度の観測
16:30	10分	吉 越 貴 紀 (宇宙線研究所)	明野観測所における小型大気チェレンコフ望遠鏡 R&D
16:40	20分	佐 古 崇 志 (横浜国立大学)	チベット高原での高エネルギー宇宙線の研究
17:30			懇親会

# 12月8日(土)

開始時間	講演時間	講 演 者	講 演 題 目
9:00	10分	伊藤真人 (気象庁)	乗鞍岳におけるブリューワー分光光度計を使用したオゾン・紫外線の 観測
9:10	10分	鴨     川     仁       (東京学芸大学)	雷活動に起因する高エネルギー放射線発生と宇宙線の関係
9:20	10分	中 村 浩 志 (信州大学)	ライチョウの域内保全―孵化後の雛1ヶ月間ケージ飼育による保護手 法の確立―
9:30	10分	松原豊(名古屋大学)	第24太陽活動期における太陽中性子の観測
9:40	10分	丸 田 恵美子 (東邦大学)	乗鞍岳・森林限界におけるオオシラビソ林の動態
9:50	10分	矢         島         千         秋           (放射線医学総合研究所)	二次宇宙線中性子の高度依存線量評価
10:00	10分	鳥 居 祥 二 (早稲田大学)	飛翔体観測による高エネルギー宇宙線加速天体の研究
10:10	20分		休憩
10:30	10分	<ul><li>増 田 公 明</li><li>(名古屋大学)</li></ul>	Knee 領域および最高エネルギー領域での宇宙線反応の実験的研究
10:40	10分	宗像一起 (信州大学)	チベット空気シャワーアレイによる10TeV 宇宙線強度の恒星時日周変 動の観測
10:50	10分	小     林     正       (青山学院大学)	エマルションチェンバーによる高エネルギー宇宙線電子の観測
11:00	20分	手 嶋 政 廣 (宇宙線研究所)	CTA 計画開発研究
11:20	10分	田 島 宏 康 (名古屋大学)	CTA 小型望遠鏡用カメラの開発
11:30	10分	窪     秀     利       (京都大学)	MAGIC 望遠鏡による超高エネルギーガンマ線天体観測

開始時間	講演時間	講 演 者	講 演 題 目
11:40	20分	常 定 芳 基 (東京工業大学)	ボリヴィア空気シャワー共同実験
12:00	10分	伊 藤 好 孝 (名古屋大学)	宇宙線将来計画タウンミーティング
12:10	60分		休憩
13:10	20分	川 田 和 正 (宇宙線研究所)	宇宙線望遠鏡による極高エネルギー宇宙線の研究
13:30	10分	川 崎 賀 也 (理化学研究所)	TA-EUSO
13:40	10分	大内正己(宇宙線研究所)	大型光赤外線望遠鏡で探る宇宙再電離
13:50	10分	本 田 守 弘 (宇宙線研究所)	大気ニュートリノフラックスの精密計算
14:00	10分	西 嶋 恭 司 (東海大学)	研究会報告
14:10	5分	梶 田 隆 章 (宇宙線研究所)	閉会の挨拶

# 1. 川村静児(宇宙線研究所)

「KAGRA の R&D および建設と観測」

重力波検出のために整備された共同利用施設を用 い、地球物理学研究を含め効果的な研究が推進され それらの成果が報告された。また、KAGRA 建設の ための実践的R&Dが順調に進められている状況が 報告された。

#### 2. 廣瀬榮一(宇宙線研究所)

「重力波検出器用鏡のコーティングの低温 Q 値測 定」

重力波検出器 KAGRA の超高性能低温鏡コー ティングの機械損失測定装置を立ち上げた。現在ま でのところ50K までしか測定されていないが、装置 の改良をすすめ KAGRA 運転温度である20K での 性能を評価する。

# 3. 宮川治(宇宙線研究所)

「計算機を使った干渉計リアルタイム制御」

CLIO において、KAGRA と同等の DAQ システ ムを用いて、短期間の試験観測を行った。延べ13時 間程度の観測データを得ることができ、そこから生 成されるフレームデータを用いて解析ソフト群の整 備を行った。

#### 4. 佐々木真人(宇宙線研究所)

「全天監視高精度宇宙線望遠鏡 Ashra 観測」

地球かすり法によるvr 初探査後、光学閃光と共 に、高感度探査を遂行中。H24年1-11月で1300時 間(Duty>18%)の観測達成。v 天体の明確な同定 を目指す巨大ニュートリノ望遠鏡(Ashra NTA)計 画への拡充も開始。

#### 5. 小川了(東邦大学)

「Ashra 観測のための撮像パイプラインの試験と 設置」

Ashra によるトリガー観測のために、東邦大学の 専用のプロジェクト室において継続的に行われてい る。共同利用研究費により、撮像パイプラインの試 験として、LED によるゲイン較正装置の開発と光 ファイバー系との統合試験と設置を推進した。

#### 6. 大橋英雄(東京海洋大学)

「地下実験室の環境連続測定」

環境計測は10年を越えた。エレベータの交換中の LiqN2補給作業時のご支援に感謝します。

「環境中に放出された放射能に関する研究」

原発事故に伴う放射能の放出は、収束段階に向 かっていることがプールの水を測定したデータから も確認された。

# 7. 櫻井敬久(山形大学)

「Be-7などによる宇宙線強度時間変化」

2000年の第23太陽活動期のピークから静穏期そし て第24活動期の2012年まで、13年間の宇宙線生成核 種 Be-7濃度の日変動データが得られた。Be-7濃度 は中性子強度の3倍の年変動を示した。

「年輪中の放射性炭素測定と微量放射性同位元素 分析」

年輪は C-14による過去の宇宙線強度変動の探索 に重要である。年輪(金峰杉1950-1990)の K-40な どの微量放射性核種の測定(1.0×10<sup>-5</sup>cps/g)と気 象データとの比較により樹木生育環境との関連を調 べている。

#### 8. 福岡孝昭(立正大学)

「南極隕石・宇宙塵の化学的研究」

隕石にカリウムが濃縮した岩片がある。小さく実体顕微鏡下でも識別が困難なので、隕石の破片をイ メージングプレートにはりつけ、地下測定組織の検 出器の余剰スペースに50日間設置したところ、40K からの y 線によりイメージングプレートが感光し、 隕石上の場所を特定できた。ドーム Fuji コア (2,900m 深)の切削氷中から宇宙塵粒子を引き続 き捜している。

#### 9. 宮原ひろ子 (宇宙線研究所)

「宇宙線起源核種および安定同位体分析による太陽活動・宇宙線・気候変動についての研究/宇宙線 が雲粒の成長に及ぼす影響に関する研究」

太陽圏環境の変化に関連して発生する宇宙線異常 増加イベントの年代決定のため、炭素14の超高精度 分析を進めている。また、宇宙線が雲活動に影響す る素過程の解明に向けて、インドとケニアにて雲の 定点モニタリングを開始した。

#### 10. 石原安野(千葉大学)

「IceCube 実験の最新成果」

IceCube 実験は2011年春までに計画されていた全 ての建設工程が終了し、2011年5月からフルスケー ル観測が開始された。2010年から取得してきた90% スケールデータ及びフルスケール初年度データの2 年分のデータを使い PeV を越えるエネルギーの ニュートリノ探索を行った。この結果、1.2-1.4PeV の放出エネルギーを持つ、ニュートリノによるカス ケード事象を2事象観測した。これらは IceCube に よってこれまで観測されてきた高エネルギーカス ケード事象の5倍以上のエネルギーを持ち、この観 測はこれまで観測されてきたπやK起源の大気 ニュートリノ背景事象のみの仮説から2.9σ、未だ 観測されていない prompt 大気ニュートリノ仮説か らは2.5σに相当する。また、それ以上のエネルギー の事象が観測されなかったことから、GZKニュー トリノのエネルギー領域において、これまででもっ とも強いニュートリノ流量上限値をつけることが出 来た。

#### 11. 奥村公宏(宇宙線研究所)

「スーパーカミオカンデ (大気ニュートリノ、陽 子崩壊等)」

2008年10月のスーパーカミオカンデ -IV 開始より 1,000日以上のデータが取得され、陽子崩壊 p -> e<sup>+</sup> +  $\pi^{0}$  モードでは90%CL で $1.3 \times 10^{34}$ 年以上の寿命を確 認、また大気ニュートリノではニュートリノ質量階 層性特定のための解析が進められている。

#### 12. 樹林敦子(岡山大学)

「スーパーカミオカンデ (太陽ニュートリノ、超 新星ニュートリノ等)」

スーパーカミオカンデにおいて、最新データを用 い太陽ニュートリノ振動解析を行った。超新星爆発 モニターは方向も精度よく求まるよう改善された。 ガドリニウム実験では、Gd 溶液水の透過率が超純 水の86% まで到達した。

#### 13. 中山祥英(宇宙線研究所)

「T2K 実験」

T2K 実験は、震災後1年以内に物理データ取得 再開を果たし、データ量は昨年報告の2倍以上に達 した。 $v_e$ 出現探索では、予測 BG 事象数3.2±0.4に 対して11事象を観測し $\theta_{13} \neq 0$ による $v\mu \rightarrow v_e$ 振動の 証拠(3.2 $\sigma$ )を世界で初めて捉えた。

#### 14. 西村康宏(宇宙線研究所)

「100万トン水チェレンコフ検出器(ハイパーカミ オカンデ)の開発研究」

次世代大型核子崩壊・ニュートリノ検出器「ハイ パーカミオカンデ」の実現に向け、国際研究チーム を立ち上げた。検出器の詳細設計や、安価で高性能 な新型光検出器等の要素開発が進んでいる。

#### 15. 田阪茂樹(岐阜大学)

「極低濃度ラドン測定システムの開発」 静電捕集型ラドン検出器10台を用いた、SK 実験 ラドン濃度測定システムを製作した。純水槽上部空 間のラドン除去空気の INPUT ラドン濃度5.1mBq/ m<sup>3</sup>、OUTPUT 23.9mBq/m<sup>3</sup>であった。また、外水槽 深度20cm の純水中8.1mBq/m<sup>3</sup>、内水槽中心の純水 中3.8mBq/m<sup>3</sup>であった。

#### 16. 荒木英一郎(海洋研究開発機構)

「神岡鉱山における歪・傾斜・地震計測」

2011年より、神岡鉱山内における連続的な孔内歪・ 傾斜・地震および孔内間隙水圧の計測を行っている。 観測された孔内歪の潮汐応答は、周囲の間隙水圧の 変化に伴って変化する様子が示唆されている。

# 17. 飯本武志(東京大学)

「地下環境におけるラドン族の空間的分布の解析 と線量評価に関する研究」

さまざまな環境のラドン族の濃度測定と解析が目 的。平衡係数=0.4の固定は安全評価上不適切な場 合あり。地下環境濃度は気流の状況により3桁範囲 で年変動。トロンの存在にも留意すべき。

#### 18. 加納靖之(京都大学)

「跡津川断層周辺での地殻活動定常観測点の高性 能化」

神岡宇宙素粒子研究施設の通信ネットワークを一 部利用して、神岡鉱山内に設置した高感度地震計、 地下水観測等のデータをリアルタイム伝送し、跡津 川断層周辺および中部日本の地震活動や地殻活動を モニターしている。

#### 19. 岸本康宏(宇宙線研究所)

「液体キセノン検出器を用いた暗黒物質探索」 2012年6月までコミッショニングランを継続し、 検出器の理解を深めると同時に、データを元に暗黒 物質とアクシオンについての制限を課した。現在、 更に解析を進めている。6月からはバックグラウン ド削減を目指し、検出器の改修を行っている。

#### 20. 竹内康雄(神戸大学)

「高純度ガス用のラドン濃度測定器の開発」

現在、80L ラドン検出器の特性試験、真空中での 測定試験、セラミックサンプルからのラドン放出量 の測定を行っている。

#### 21. 身内賢太朗(神戸大学)

「ガス飛跡検出器による方向に感度を持つ暗黒物 質探索」 方向に感度を持つ暗黒物質探索実験の、2011年の 高感度化を受け、2012年1月から連続観測を行って いる。一部解析の結果、以前の制限を上回る感度を 持つことを確認した。

#### 22. 中村正吾(横浜国立大学)

「液体キセノンのシンチレーションの減衰時間の 研究」

時間相関単一光子計数法に基づいた実験系を構築 し、液体キセノンのシンチレーションの減衰時間を 発光波長と共に測定した。現在、取得したデータを 慎重に解析している段階にある。

## 23. 吉田斉(大阪大学)

「48Ca の二重ベータ崩壊の研究」

48Caを使用した二重ベータ崩壊の研究では、現 在までに、300kgのCaF<sub>2</sub>検出器を使用した検出器 (CANDLES-III号)を神岡施設の地下実験室Dに 設置している。今年度、エネルギー分解能向上のた めに集光器を導入し30%強の改善を実現した。現在 は Background データ解析を精力的に進めている。

#### 24. 斎藤嘉彦(東京工業大学)

「MITSuME(爆発変動天体の多色撮像観測)プロ ジェクト」

4つのガンマ線バーストに対して追跡観測を行 い、うち2件の可視光光度曲線を得た。加えて大学 間連携事業の一環として超新星や活動銀河核、X線 新星の観測を実施したほか、木曽広視野カメラ超新 星探査プロジェクトとの協力を推進した。

#### 25. 小島浩司 (愛知工業大学)

「大型ミューオンテレスコープによる銀河宇宙線 強度の観測」

我々は、南インド Ooty と山梨県の明野に設置し た大型ミューオンテレスコープを用いて銀河宇宙線 の諸現象を解明し、太陽圏内及び周辺恒星間空間の 電磁的環境の物理的性質を明らかにする事を目的し て観測を行っている。

#### 26. 吉越貴紀(宇宙線研究所)

「明野観測所における小型大気チェレンコフ望遠 鏡 R&D」

地上ガンマ線天文台将来計画の試験開発拠点とし て、国内唯一の大気チェレンコフ望遠鏡を明野観測 所に設置し、その整備を行っている。2011年度は小 型鏡全枚の再蒸着を完了し、駆動制御システムの自 動化を行った。

#### 27. 佐古崇志(横浜国立大学)

「チベット高原での高エネルギー宇宙線の研究」

チベットグループの次期計画である MD 及び YAC の建設の現状について報告した。さらに最近 の結果として、かに星雲からの100TeV ガンマ線探 索と3TeV での太陽の影について報告した。

#### 28. 伊藤真人 (気象庁)

「乗鞍岳におけるブリューワー分光光度計を使用 したオゾン・紫外線の観測」

昨年に引き続き、乗鞍において夏季のオゾン・紫 外線の観測を試みた。乗鞍のオゾン量はつくばより 3%程度低く、紫外線量は晴天時に短波長域で非 常に多いことが判明した。また観測用常数の校正も 良好な結果を得た。

# 29. 鴨川仁(東京学芸大学)

「雷活動に起因する高エネルギー放射線発生と宇 宙線の関係」

雷放電時のみならず雷雲発生時においても高エネ ルギー放射線が測定されることはしばしば報告され ているが、後者の発生機構については、有望な仮説 が提案されている段階である。この発生機構を解明 するために、高エネルギー放射線、大気電気、レー ダーエコーの複合観測を行うことで、仮説の検証を 行う。2012年より宇宙線研究所の乗鞍観測所におい て行った観測では、雷活動は複数回観測されたが高 エネルギー放射線は観測されなかった。

その理由のひとつはいずれの雷活動の規模が小さ かったためと推測される。それゆえ今後はより長い 観測期間において測定を行うべきだと考える。

#### 30. 中村浩志(信州大学)

「ライチョウの域内保全一孵化後の雛1ヶ月間 ケージ飼育による保護手法の確立一」

ライチョウは、孵化後1ヶ月間の雛の死亡率が高 く、その原因は悪天候と捕食であることがわかった。 孵化後の家族をこの間のみ安全なケージで飼育する 保護策の検討が、乗鞍岳の東大宇宙線観測所の敷地 内で開始された。

#### 31. 松原豊(名古屋大学)

「第24太陽活動期における太陽中性子の観測」 乗鞍での太陽中性子観測は、第24太陽活動期で太 陽高エネルギー粒子加速の解明を行うために、本年 度は新風力発電の設置、夏期の AC100V 利用を行った他 PC を更新した。太陽活動は次年度極大になる と予想され、太陽中性子イベントを期待したい。

#### 32. 丸田恵美子(東邦大学)

「乗鞍岳·森林限界におけるオオシラビソ林の動態」 乗鞍岳の標高2,500m付近の森林限界を形成する オオシラビソは、稚樹が成長して冬季の積雪面3m 以上になると冬季に枝・葉が様々な環境ストレスを 受け、約30年で幹全体が衰退するが、次代を担う新 たな幹が成長を開始することで個体の維持を図って いた。

#### 33. 矢島千秋(放射線医学総合研究所)

「二次宇宙線中性子の高度依存線量評価」

乗鞍観測所と鈴蘭連絡所(標高差約1,300m)にお いてフォスウィッチ検出器を用いて測定した二次宇 宙線中性子エネルギースペクトル中に高度依存性が 現れることを確認した。定量的評価は今後の課題で ある。

#### 34. 鳥居祥二(早稲田大学)

「飛翔体観測による高エネルギー宇宙線加速天体 の研究」

CERN-SPS において、CALET の熱構造モデルを 用いたビーム実験を実施して観測性能実証を行っ た。その成果をもとに、2014年夏期の打ち上げを目 指して搭載装置の製作・試験を実施している。

#### 35. 增田公明(名古屋大学)

「Knee 領域および最高エネルギー領域での宇宙線 反応の実験的研究」

超高エネルギー反応モデルの構築を目指して、 LHC 加速器で450GeV 及び3.5TeV 陽子衝突実験

(LHCf)を行い、最前方光子及び中性π粒子に関 する論文を発表した。次の実験に向けて検出器を改 良している。

#### 36. 宗像一起(信州大学)

「乗鞍岳におけるミューオンの精密測定」

乗鞍ミューオン計は、全アンプ基板上の CR 回路 をポッティングして高圧の漏電対策を施し、冬季閉 鎖中も現在まで安定に連続観測中である。来年度太 陽電池パネル架台の改修を行う予定。

「チベット空気シャワーアレイによる10TeV 宇宙 線強度の恒星時日周変動の観測」

Tibet 空気シャワーアレイ及び SK で観測された

恒星時異方性が示唆する銀河磁場の方向は、最近星 光の偏光観測から導かれた局所銀河磁場方向と極め て良い一致を見せている。

#### 37. 小林正(青山学院大学)

「エマルションチェンバーによる高エネルギー宇 宙線電子の観測」

ECC による気球観測から30GeV~3TeV 領域の宇 宙線電子スペクトルの最終報告(2012, ApJ. 760, 146)を行った。又 CERN 電子線のシャワー発生点 分布の解析から LPM 効果の検証を行った。

#### 38. 手嶋政廣(宇宙線研究所)

「CTA 計画開発研究」

CTA は日米欧を中心とする国際共同研究として、 現在準備研究が進んでいる。2013年には南北のサイ トを決定し、2015年より本格的な建設に入る予定で ある。日本グループは大口径23m 望遠鏡の高分解能 カメラ、分割鏡、そして Dual Mirror 望遠鏡のカメ ラ等の開発研究を宇宙線研共同利用により効率的に 推進している。また、CTA のサイエンスに関する 理論研究も複数のトピックに関して主導的な立場で すすめている。

#### 39. 田島宏康(名古屋大学)

「CTA 小型望遠鏡用カメラの開発」

CTA の小型望遠鏡の要となる高い量子効率を持 つ多チャンネル光検出素子 MPPC の基礎特性を測 定し、その動作条件と性能を評価した。また波形記 録のための多チャンネル集積回路 TARGET-5を開発 し、その帯域幅やダイナミックレンジ等の性能が要 求を満たしている事を確認した。

#### 40. 窪秀利(京都大学)

「MAGIC 望遠鏡による超高エネルギーガンマ線 天体観測」

2台の口径17m 解像型大気チェレンコフ望遠鏡 MAGICを用いて、かに星雲・パルサー、分子雲・ 超新星残骸 W51、活動銀河核(赤方偏移0.36と0.06) からの超高エネルギー y 線を検出した。また、望遠 鏡カメラ等をアップグレードした。

#### 41. 常定芳基(東京工業大学)

「ボリヴィア空気シャワー共同実験」

knee 領域以上の宇宙線原子核組成を研究するため、BASJE ではチャカルタヤ観測所に空気シャワー アレイとの連動実験として7台のチェレンコフ光検 出器を設置し、信号取得に成功した。本格観測は 2013年春より開始する。

## 42. 川田和正(宇宙線研究所)

「宇宙線望遠鏡による極高エネルギー宇宙線の研 究」

テレスコープアレイ(TA)実験による極高エネ ルギー宇宙線のエネルギースペクトル、質量組成、 異方性等の結果を報告した。TA実験とAuger実験 の間ではエネルギースケールや質量組成の違いにつ いての検討が始まっている。

#### 43. 川崎賀也(理化学研究所)

「TA-EUSO」

JEM-EUSO の地上試験モデルでもある TA-EUSO の開発が進んでいる。レンズの製作および、検出器 の電子回路系の開発は順調に進んでおり、2月後半 にユタの TA サイトに設置、その後試験観測を開始 する予定である。

#### 44. 大内正己(宇宙線研究所)

「大型光赤外線望遠鏡で探る宇宙再電離」

すばる HSC による宇宙再電離研究に向けて狭帯 域フィルターの試作品を作成した。フィルター端に おいて透過率曲線の目標性能は実現できていないも のの、r=200mmの中心部分で目標を達成できた。 またこの準備研究としてすばるおよびハッブル望遠 鏡等による宇宙再電離期の銀河研究を行い8編の論 文を査読誌に投稿した。

#### 45. 本田守弘(宇宙線研究所)

「大気ニュートリノフラックスの精密計算」

今年度は大気モデルの改良に務め、これまでの大 気モデルUS-Standard '76 を、最近提案された MSISE00に切り替えた。新しい計算では、現在の所 統計不足で精密な結果ではないが、神岡など中低緯 度では従来の計算と大きな差は見られていない。一 方、南極など高緯度地方では、明らかな違いがあり、 高エネルギーになるほど、その違いは大きくなる傾 向がある。近く高い統計の結果をまとめ、論文に発 表する。

# 研究紹介

# 神岡地下実験施設における暗黒物質直接探索XMASS実験の現状と将来

小川 (宇宙線研究所) (宇宙線研究所)

#### 1. はじめに

XMASS 実験は暗黒物質直接探索を目的とした実 験で、2008年にプロジェクトが開始されました。 2010年末に検出器の建設が神岡地下実験室にて終了 しており、観測データを取得し解析を行なっており ます。予期せぬバックグラウンドが判明したものの 物理結果も出始めました。検出器デザイン段階では 特に視野に入れていなかったアクシオンや超新星爆 発からのニュートリノ信号など面白い物理が期待で きることも分かって来ました。本稿ではその結果と ともに検出器の改造も含め将来の展望を紹介します。

#### 2. 暗黒物質直接探索と国際動向

近年における宇宙背景輻射の観測実験は目覚まし い成果を上げており、宇宙組成をみると、通常の物 質、すなわち、陽子や中性子など"目に見える"(観 測されている)物質は全体の約4パーセントにすぎ ないことが報告され、その5~6倍は未知の物質 (暗黒物質)が占めていると考えられます。他にも 暗黒物質の存在を示すものとして、銀河団同士の衝 突、Bullet Cluster の重力レンズによる観測も挙げら れます。このような状況の中、暗黒物質を直接観測 することの意義はますます高まっていると言えま す。観測事実からいくつかのその性質が推測され、 (1)電荷を持たず、(2)非相対論的速度で飛び交い(大 規模構造)、(3)安定である必要があります。現在、 この"見えない"物質の有力候補の一つは、Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) と呼ばれ、 SUSY で予想される新しい粒子のなかでも質量の最 も小さいニュートラリーノであると考えられていま す。この宇宙物理と素粒子物理から注目される暗黒 物質探索は、現在10以上の探索グループが激しい国 際競争を繰り広げており、まさに21世紀の大きな チャレンジの一つであると言えます。

暗黒物質の太陽系での局所的な密度は約0.3GeV/cm<sup>3</sup> でおよそ光の1000分の1程度の速度で飛来している と考えられており、暗黒物質と通常の物質との断面 積を仮定すれば地球に置いた検出器におけるエネル

ギースペクトルを計算することができます。図1に 断面積10<sup>-43</sup>cm<sup>2</sup>を仮定した場合の Ar, Ge および Xe の場合のエネルギースペクトラムを示します。 こ れからも分かるようにエネルギーが低いほど事象が 多いので、検出器には質量を大きくするだけでな く、如何にエネルギー閾値を下げられるかが非常に 重要です。SUSY で予想されるパラメーターの領域 は暗黒物質と核子の断面積にして、10<sup>-41</sup>cm<sup>2</sup>から 10<sup>-47</sup> cm<sup>2</sup>以下と広大に広がっており、検出器の重さ あたりの事象頻度として、約0.1 events/kg/day から 1×10<sup>-6</sup>events/kg/dayとなります。 最近の結果を みると10<sup>-44</sup>cm<sup>2</sup>付近までは米国 CDMS II や XE-NON100実験で制限値が与えられており、この領域 をさらに推し進めるためには新しい検出器のテクノ ロジーが要求され、具体的には100kg以上の有効質 量をもち、極めて低いバックグラウンドが要求され ます。10年前頃はGe検出器を中心に半導体/ボロ メータの技術を用いた実験がこの分野をリードして





きましたが、最近では大型化が容易な希ガス液体検 出器、特に液体 Xe 出器が成果を出し始めました。 液体 Xe 検出器はシンチレーターとして光量も多 く、質量数(131)が大きいため WIMP との断面積 が大きく、Ge 検出器などに比べコストも低くなる という特徴があります。

一方で2010年に440gのGe検出器を用いた米国 CoGENT グループが質量の小さい領域に WIMP の 信号を示唆する報告をしました。(すぐ後に CRESST 実験も続いた。) 統計的にまだ発見には 至っておりませんが、DAMAの結果と大きく違わ ない領域であるため注目を浴びています。一方でこ の状況は、まだ素直に受け入れられていません。そ の理由は、CDMS II や XENON 実験などによって既 にその領域が排除されているからです。検出器の ターゲットによる違いなのか? (DAMA は Nal. CoGeNT, CDMS II は Ge 検 出 器。) それならば、 CoGeNT で見える信号は CDMS II でみえるはず… または、WIMP は電磁相互作用をしないと考えられ ているので検出器からの信号は反跳核を通して得ら れると考えるのが自然で、CDMS II や XENON100 では反跳核のみを粒子弁別を行なって選択している が、それがいけないのか? CoGENT グループ自体 も大型化した、さらに感度の高い検出器の計画を進 めているところで、近い将来にもっとはっきりとし

た答えがでると期待されています。 一方で DAMA を追認するにはまずは同じ NaI を使うべし、という ことで南極に NaI を持って行く(DM-ICE)という アイディアもでています。

#### 3. XMASS 実験

XMASS(エックスマス)の名称は、以下の3つに 由来しています。

- Xenon detector for weakly interacting MASSive Particles (暗黒物質探索)
- Xenon MASSive detector for solar neutrino (pp/Be 太陽ニュートリノ観測)
- Xenon neutrino MASS detector (二重ベータ崩壊実験) これらが示す通り、多目的実験となっています。

特徴として、液体キセノンのシンチレータとしての 高い性能(発光量は Nal シンチレータなみ)と、高 密度(およそ3g/cm<sup>3</sup>)であることに由来する外部バッ クグラウンドに対する自己遮蔽効果による低バック グラウンド化により、低閾値での稀事象探索に優れ た検出器となっています。また、光電子増倍管の検 出光情報から、位置事象再構成が可能となっています。

#### √ 検出器概要

ここからは、検出器の概要を簡単に説明します。 図 3-1 は XMASS 検出器の全景です。中心の "ID



(inner detector)"に液体キセノン及び光電子増倍管 が設置され、液体キセノン-100度を保つための真 空断熱容器となっています。外環は直径10m、高さ 10.51mの純水タンク容器となっており、外部から のバックグラウンドの遮蔽体となっています。ま た、壁部に設置された20インチ光電子増倍管によっ てミューオン粒子 Veto としても働きます。上部へ 向かう管は光電子増倍管や、検出器内部設置セン サーからの信号線を通し、また、検出器較正線源導 入管として用いられます。側部への管はキセノン導 入、液体キセノン循環用配管となっています。

"ID"について図3-2でもう少し詳しく見てみ ましょう。キセノンからのシンチレーション光は浜 松フォトニクス社製光電子増倍管 R10789(6角が 630本、丸型が12本)によって受得されます。光電 子増倍管は高い光受得面積となるように、無酸素銅 製三角ホルダーに蜂の巣状に設置され、正60面体と なります。これをこれまた無酸素銅で作られたキセ ノン容器に液体キセノンと一緒に入れます。

液体キセノンはおよそ-100℃で、ベーパー圧力 1.6気圧で安定させる必要があります。キセノンの 保持、検出器への導入、回収、純化システムを図 3-3に示します。検出器内の液体キセノンを保持 するために、我々は岩谷産業製パルス型冷凍機を使 用しております。また、液体キセノン用タンク(liquid xenon reservoir tank)を設置しており、これは、検出 器へ導入する前のキセノンを液体で保持することが できます。検出器へのキセノン導入の流れとしては 以下のようになります。まず液体キセノン用タンク 内に設置されたヒーターを使い、液体キセノンを蒸 発させます。蒸発したガスキセノンをキセノン純化 ゲッターに通し、検出器に設置された冷凍機で再び 液化して、検出器に液体キセノンをためていきま す。我々の設備ではおよそガス換算で30L/min での



図3-2:XMASS 検出器内部構造。6 角及び丸型光電子増倍管を三角の銅ホルダー に設置される。三角ホルダーは正60面体をなし、検出器内に設置される。



キセノン純化、導入ができ、完全に検出器に満たさ れるまでにはおよそ5日かかります。また、検出器 からのキセノン回収については、液体キセノン用タ ンクへの液体のままでの回収が可能となっており、 およそ2時間たらずで回収を行うことができます。 冷凍機故障などの緊急時のために、液体窒素による 冷却機構、緊急用キセノンガス回収タンクを設置し ています。

#### √データ取得システム及び検出器パフォーマンス

図3-4は XMASS 実験のデータ取得システムで す。光電子増倍管642本に取得された信号は11mの 同軸ケーブルおよびフィードスル-を通り、水タン ク上部のエレクトロニクスハットにて A/D 変換さ れます。信号は増幅後、スーパーカミオカンデ I-III で使用されていた Analog-Timing-Module (ATM) に よって光電子増倍管からの荷電情報、時間情報を記 録することになります。同時に CAEN 社製 FADC (V1751:各増倍管ごと、V1721:60チャンネルごと) でもデータを取得できます。OD でも同様にデータ を取得しており、トリガーレートはIDでおよそ 4Hz、ODでおよそ7Hzです。



図3-4:データ取得システムの模式図。

検出された信号のエネルギー及び位置事象再構成 は、事象反応点で期待される信号パターンをモンテ カルロシミュレーションで算出し、実際の信号と比 較することで求められます。 検出器の較正として は、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 価しています。図3-5がエネルギー較正装置の絵 です。ロッドの先端にガンマ線源を装着し、検出器 内部まで挿入することができます。ガンマ線源とし ては<sup>57</sup>Co、<sup>241</sup>Am、<sup>109</sup>Cd、<sup>55</sup>Fe、<sup>137</sup>Cs 等を用いていま す。図 3-6 は<sup>57</sup>Co 線源(122keV が主なエネルギー) を導入した際を実際のデータとモンテカルロシミュ レーションの比較したものです。上の図は、検出さ れた光量のスペクトラムとなっています。この結 果、光量はおよそ15pe/keVと、当初の我々が想定 した光量より、およそ3倍も多いことがわかりまし た。また、中、下の図にあるデータとモンテカルロ シミュレーションの再構成したエネルギー、事象位 置は良い一致を示していることがわかります。

#### √実験の進捗

検出器へのキセノンを始めて導入したのは2010年 の10月です。ここから2012年5月まで、コミッショ ニングランとしてさまざまなデータを取得しまし た。残念ながら、2012年5月に較正用線源ロッドの 不具合により取り出せなくなったため、コミッショ ニングランは終了せざるを得なくなりました。コ ミッショニング中にも暗黒物質探索のための物理ラ ンは、適宜収集されていました。その解析の進捗、 結果は、この章の最後及び次章で述べましょう。そ の他にキセノンの光学特性を変えたことによる検出



図3-5:較正用線源駆動装置及び、線源導入の様子を絵で示した。駆動装置は水 タンク上部に設置されている。



23-6. 上の図が Co 緑源による使出るで使出された元重 の分布。中、下の図が事象再構成をおこなったこ とによるエネルギー分布と、場所の分布。線源の 場所は z=-40~+40cm であり、この図ではまと めて表示している。

器のパフォーマンスを見るために、液体キセノンの 密度を変えたデータ、酸素を足したデータ、検出器 側部を温めて液体キセノンを対流させてのデータを 取得しました。また、バックグラウンド理解のため に、液体ではなくガスキセノンによるデータも取得 しました。上で述べた較正データも取得しました が、検出器の低バックグラウンド環境を利用した、 部材サンプルの放射線測定も行われたことも言って おきましょう。

#### ✓位置事象再構成を用いた暗黒物質探索

ここからは、本来の XMASS 実験の目標であった、 位置事象再構成を用いた暗黒物質探索を述べましょ う。

その前に XMASS 実験のバックグラウンドについ て説明が必要でありましょう。我々は XMASS 検出 器建設にあたって、部材の放射線不純物測定をゲル マニウム検出器で行い、部材の選定を行ってきまし た。当初想定された主なバックグラウンド源として



図3-7:バックグラウンド源の一つとなっている光電子増 倍管のアルミニウムシール部の写真。この部分は 直接液体キセノンに触れることになる。

は、光電子増倍管"内部"のガンマ線でした。実験 開始後、データ解析および、モンテカルロシミュ レーションを用いて、測定されたスペクトルと、シ ミュレーションの比較を行いました。また、検出器 内部の部材の放射性不純物の再評価を行いました。 その結果、光電子増倍管を真空にシールするための アルミニウム(図 3 - 7)にある<sup>238</sup>U  $\sim$ <sup>230</sup>Th およ び<sup>210</sup>Pb が、低エネルギーでの主要なバックグラウ ンド源であることがわってきました。また、FADC による a 線解析より、検出器内表面にある銅ホル ダーに付着した<sup>210</sup>Pbも、同様にバックグラウンド 源であることがわかりました。図3-8の測定され た物理データとモンテカルロシミュレーションによ る期待されるバックグラウンドのエネルギー分布を 見てみましょう。ここで重要なのが、これらの新た に同定されたバックグラウンド源は、検出器の"表 面"に接していることです。これらのバックグラウ ンド源はガンマ線にとどまらず、ベータ、アルファ 線が検出されることになってしまいます。これら が、暗黒物質探索エネルギー領域における重大な バックグラウンド源となります。また、5keV以下 のバックグラウンドにも、予想外のものがあること があきらかになりました。その候補としまして、光 電子増倍管と検出器ホルダー間にクッション材とし てもちいられるゴアテックス(図3-9)が挙げら れます。ゴアテックスからは部材成分中に含まれ る<sup>14</sup>C、外部から付着、侵入した<sup>210</sup>Pb が、5 keV 以 下の低エネルギー事象を作る可能性があります。

次に位置事象再構成についてですが、特に暗黒物 質探索領域(5-10keV)のような低エネルギー領 域では、例え有効体積外部で起こった事象でも、あ る割合で、有効体積内で起こった事象として同定さ れてしまいます。これは検出器壁際であり、光電子



図3-8:観測されたデータとモンテカルロシミュレーションで生成した期待されるバックグラウンド事象のエネルギー分布。黒線がデータ、黄色、赤がモンテカルロシミュレーション。黄色が当初想定されていた光電子増倍管からのバックグラウンド事象。赤が検出器表面でおこったバックグラウンド事象となっている。



**図3-9**:光電子増倍管とホルダー間にあるゴアテックス。 クッション材として使われている。

増倍管の死角で起こったような事象が、有効体積内 で起こるべき事象のヒットパターンと類似している からです。現在、位置事象再構成ツールの改良、時 間情報による位置事象再構成、幾何学的解析による 有効体積内外事象の判別などを用いた解析を現在実 施しているところです。同時に元のバックグラウン ド源を減らすための検出器改造を進めています。こ のことについては次々章で述べましょう。

次章では、現在までの XMASS 実験の物理結果に ついて説明します。

#### 4. これまでの物理成果

#### ✓質量の小さい暗黒物質探索

WIMP 質量10GeV 付近は最近注目を浴びている 領域ですが、CDMS II や XENON100によって排除 されている領域でもあります。これらの検出器は粒 子弁別を行い反跳核の信号のみを見ているので、



図4-1:XMASSによる6.7日のデータ(エラーバー付)。
 エネルギー閾値0.3keVで検出器効率は約40%.7、
 12、18GeVのWIMP質量を仮定した時のエネル
 ギースペクトラムをそれぞれ緑、青、赤で示した。

DAMA や CoGENT のように反跳核だけでなく反跳 電子事象もみることは意義のあることです。例えば XENON10では電離電子による信号のみを使うこと でエネルギー閾値を極力下げ、粒子弁別をしない解 析も行なっています。 XMASS 実験では、シンチ レーション光の信号のみを利用し、キーとなるアイ ディアは自己遮蔽、つまり位置較正を用いて中心の 殆どバックグランドのない中心領域を探索に使うと いうものでした。しかし、バックグランドが当初の 計画よりも多いとはいえ、他の実験と比べると全く 遜色なく、エネルギー閾値が0.3keVと非常に低い ため、この特色を生かした解析を行いました。特に 10GeV 程度の WIMP 探索では、より低いエネルギー 閾値が重要です。解析に位置較正の情報を使い fiducial cut を入れるとどうしてもエネルギー閾値を 上げざるおえなく、その系統誤差も増えます。しか し、あえて fiducial cut を入れずに検出器全体を用 い、エネルギー閾値を低く抑えたまま解析を行うと 質量の小さい WIMP 探索に大変有効です。この場 合、反跳核と反跳電子の両方に感度のある解析にな ります。図 4 - 1 にこの解析で得られた XMASS で の6.7日文のデータを用いたエネルギースペクトラ ムと7、12、18 GeV の WIMP 質量を仮定したとき のエネルギースペクトルを示します。なお、WIMP の信号によるエネルギースペクトラムはデータと同 じ取扱いができるように、データと同様のモンテカ ルロ・シミュレーションの結果に対して解析を行 なっており、検出器内の位置依存性も考慮されてい



図4-2:スピンに依存しない場合のWIMP-核子断面積。
 赤線はLeffを除いたすべての統計、系統誤差を考慮にれたXMASSによる結果(CL90%)、帯は
 Leffによる不定性を表す。

ます。また、検出効率は0.3keV でおよそ40% です。 図4-1をもとにして得られた制限曲線が図4-2に なります。現存のバックグランドでも DAMA や CRESST で報告されている信号領域の一部を排除す る感度が得られました。 感度曲線の一番の誤差の 原因は反跳核に対する発光効率(Leff)不定性で図 中では帯で示されており、この精度を上げることは 将来の課題となります。また、前述の改造により、 このエネルギー領域のバックグラウンド起源として 疑われている PMT と構造体の間にはめられたゴア テックスを取り除くことにより、1桁以上感度が上 がることが期待されます。

#### ✓ Axion 探索

Axion は強い相互作用における CP の破れの問題 を解決するために Peccei と Quinn (PQ) が標準モ デルを拡張する際に導入した粒子です。70年代後半 に提唱された初期モデルの PQ スケール  $f_a$  は電弱相 互作用対称性の破れるエネルギースケール  $v_{weak}$  と 密接な関係があると考えられていましたが、これは 実験的にすぐに否定されました。しかし、これらの エネルギースケールが異なっていても理論的には問 題なく  $f_a >> v_{weak}$ の場合は特に invisible Axion (不可 視 Axion) と呼ばれ、暗黒物質の候補でもあり現在 でも精力的に探索が行われています。

Axion 探索では Axion または ALP (Axion-like particle) と光子  $(g_{a\gamma\gamma})$ 、電子  $(g_{ace})$  または原子核  $(g_{aNN})$ との結合を利用することになります。探索の方法は



 図4-3:観測データ(エラーバー付き)とAxionからの 予想されるエネルギースペクトラム(実線)。
 Axionの質量を0、5、10、50keVをそれぞれ仮定している。

大きく3つの手法に分けることができ、(1)実験室に 線源と検出器を用意する方法(2)天体観測により理論 モデルを検証する方法(3)実験室に置かれた検出器 で太陽等からのアクシオンを捕らえる方法がありま す。実験方法としては感度を上げるために様々な手 法が取られ、gaveを狙う実験では強い磁場や長い変 換領域を用い Primakov 効果を利用する、gann の場 合は共鳴吸収をする原子核(<sup>57</sup>Fe)を用いるなどの 工夫がなされます。しかし、電子との結合 gaee に関 しての探索はあまり行われておらず、感度の向上が 期待される所です。XMASS では前述の通り、エネ ルギー閾値が非常に低く、大質量検出器であるため にこの様なアプローチには適しており、ガンマ線の 光電吸収のように太陽で作られた Axion が検出器媒 体の電子を弾き飛ばしたときの信号を捕らえます。 図 4-3 に6.7 日分の観測データと Axion からの予想 される信号を示します。エラーバーの付いたヒスト グラムは XMASS での観測データ、付いていないヒ ストグラムはそれぞれアクシオンの質量0、5、10、 50keVを仮定した場合の信号から得られるエネル ギースペクトルを表しています。図中では、ある結 合定数 gaee を仮定しており、この値よりも大きい場 合は観測データと矛盾するので制限曲線を引くこと ができます。これを理論モデルと共に示したものが 図 4-4 になり、今回の XMASS の成果では Axion の質量が1keV以下で既存の結果よりも2倍ほど強 い制限を与え、10-40keVの領域では太陽ニュート リノの観測によって得られる制限よりも強い制限が



 図4-4:結合定数 gaee に対する制限曲線。実線は観測に よる制限で破線は理論で予想されるモデル、さら に Red Giants および solar neutrino から来る制限 を表している。なお、CoGeNT と CDMS は暗黒 物質の仮定を入れた計算に基づいている。

#### 得られました。

#### 5. XMASS 実験の将来の展望

#### ✓ XMASS 検出器改造

XMASS 検出器における測定は2010年より開始 し、検出器の調整、データの測定を行ってきました。 その結果、以下のことが分かってきました。

- 1)検出器自身のパフォーマンスとして、発光量は 当初のもくろみよりも高く、予想のおよそ3倍 の発光量を達成できました。内部較正線源に よって、事象再構成の性能が確認されました。
- 2)光電子増倍管内のガンマ線の他に、検出器表面 起源からのバックグラウンド源が同定されました。

以上の結果より、暗黒物質探索感度を向上させる ためには、表面バックグラウンドの低減が必要不可 欠です。よって現在我々は、検出器の改造を実施し ています。

しかし、残念ながら、問題となる光電子増倍管を とりかえ、アルミからのバックグラウンドを完全に なくす事は、すぐにはできません。経費と製作まで の時間が長くかかります。そこで、すぐできる改造 として、検出器表面からのバックグラウンドを遮蔽 するためのシールドの設置、クッション材として用 いられているゴアテックスの除去、検出器表面の洗 浄による<sup>210</sup>Pb の低減を行うことにしました。

検出器表面に付着した<sup>210</sup>Pb については、低エネ

ルギーの事象について、<sup>210</sup>Poのα崩壊時における <sup>206</sup>Pbの原子核事象が液体キセノン中で観測される ことになります。この事象は暗黒物質によるキセノ ン原子核弾性散乱事象と波形情報が似ており、将来 的に行いたい FADC を用いた粒子識別でも識別は 不可能となります。このため、必ず除去する必要が あります。表面の洗浄については電解研磨を行いま す。また、実際の作業における超低バックグラウン ド環境の構築を行います。

改造後、測定を再開し、まずは検出器のパフォー マンスを評価する予定です。較正線源によって、光 量が改造前と同程度に測定されているか、シールド および洗浄によってバックグラウンドは低減されて いるかを確認し、シミュレーションと比較を行いま す。事象再構成などによりバックグラウンド事象を 低減後、より高感度での暗黒物質探索を行うつもり です。

今回の XMASS800kg 改造でバックグランドを1 桁以上は改善できると考えています。その場合、 WIMP-核子の断面積にして10<sup>-44</sup>cm<sup>2</sup>を超えることも 可能で、超対称性理論のパラメーター領域に入り込 んでいくことになります。 さらに、もう一つ注目 したいのが、季節変動を用いた DAMA 実験の検証 が可能になることです。季節変動を用いた解析で DAMA と同じかそれ以上の感度を持った報告は未 だにありませんが、XMASS 検出器の大きな質量を 生かすことで、10年以上の年周期を観測した DAMA グループに対して、XMASS では1年で殆ど 同じ統計になり、十分な感度があります。また、暗 黒物質探索だけでなく超新星爆発によるニュートリ ノバーストを観測することも期待できます。スー パーカミオカンデの約20ktonという大きな有効質 量に対して XMASS ではほぼ 1 ton しか有りません が、スーパーカミオカンデでは主に反電子ニュート リノの陽子による捕獲によって観測されるのに対 し、XMASS 検出器ではニュートリノによるコヒー レントにキセノン原子核と散乱された信号を捕らえ ることでそれが可能となります。例えば、1987aの ような超新星爆発が銀河中心で起こったとすると約 20事象、ペテルギウスで起こると数万事象得られる と見積もっています。また、ニュートリノ―原子核 散乱を通して観測されたことは今までにないユニー クな点で、大きな成果の一つになると考えています。

また、さらに感度を上げるべく XMASS 実験の次 のステップの検出器の構想も提案しています。液体 キセノン5 ton、有効体積1 ton を保有する検出器 で、従来の物よりも質量は5倍以上大きいですが、

サイズは直径約1.5m ほどなので現存の水タンクを そのまま利用することができ、安価に建設時間を短 くアップグレードすることができます。また、今回 問題となったアルミ材料に関しても現存のものより も4-5桁少ない放射性不純物のものを使用出来る ことにめどがついておりますので形状も踏まえ新た なPMTを開発することも可能です。図5に XMASS1.5で予想される感度曲線を示しました。現 在の制限値よりも一桁以上良い探索を目指します。 XENON 実験も XENON1t のデザインをはじめてい るので緊急性は高く、2014年度開始に向けて、 XMASS1.5のスタディ、予算獲得に努力を続けてお ります。幸いにもコミュニティでは良い評価をもら いましたが、将来計画を実現するためにも今回の改 造、そしてその結果は言うまでもなく我々にとって 重要です。



 図5: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~10<sup>-45</sup>cm<sup>2</sup>までの広い領域 を探索できる。



#### I. はじめに

理論グループでは、様々な角度から宇宙論および 素粒子論に関する理論的研究を行っている。本稿だ けでは理論グループの近況を網羅的に紹介すること は不可能であるため、それは諦め、私が近年行って いるスーパーストリング理論に立脚した宇宙論(弦 理論的宇宙論)について紹介することにする。特に、 弦理論的宇宙論業界で近年注目を浴びている「スト リングランドスケープ」にスポットライトを当て、 宇宙マイクロ波背景輻射(CMB)による観測可能 性について議論したい。本稿が、弦理論的宇宙論の 一端を知る一助になれば幸いである。

#### I. 弦理論的宇宙論とは

ストリングランドスケープの議論に入る前に、弦 理論的宇宙論について簡単に述べたい。スーパース トリング理論とは、根源的な物体として「点粒子」 でなく、「弦」を導入した理論である。詳細につい ては割愛するが、弦を基本要素と考えることで、自然 に重力を量子化したものが得られることが期待され ている。このことからスーパーストリング理論が4 つの力(重力、電磁気力、強い力、弱い力)を含む 万物の理論となりえる可能性が指摘されている。近 年の素粒子物理学の急速な進展に伴い、相互作用の 究極の統一理論の候補としてのスーパーストリング 理論に関する理論的研究が盛んに行われている。

スーパーストリング理論が我々の宇宙を記述する 理論であることを明らかにするには、その特徴的な シグナルを観測的に探査・検出・測定することが必 須である。しかし、その兆候は現在の加速器実験で は到達不可能なほどの超高エネルギー物理現象にお いてしか現れない。一方で、非線形、初期宇宙、強 重力下においてはその影響が色濃く反映されること から、スーパーストリング理論のエッセンスを取り 入れた宇宙論模型を構成することは理論的/観測的 に重要になる。このような分野を弦理論的宇宙論と 呼び、そこから導かれる特徴的シグナルを観測と照 らし合わせることでスーパーストリング理論に迫っ ていくことができると期待している。現在の標準的 な初期宇宙モデルは、初期にインフレーションと呼 ばれる宇宙の急速な加速膨張期が行ったと考えられ ているが、現在までにスーパーストリング理論の文 脈で、観測と整合的なインフレーション模型がいく つか提唱されている [1]。

# Ⅲ. ストリングランドスケープ

さて、本稿のメイントピックであるストリングラ ンドスケープに目を向けることにする。これまで スーパーストリング理論では、理論の整合性からた だ一つの真空状態が自然に選ばれると期待されてき た。しかし、近年の詳細な研究により、スーパース トリング理論にはコンパクト化の方法や内部空間に 存在するフラックスの値によって異なる偽真空状態 になることが明らかになってきた。それぞれの偽真 空においては、宇宙項の値、基礎物理定数、さらに は次元数すらも異なっていてよい。コンパクト化の 方法やフラックスの値は非常に多く存在することか ら、偽真空の数は莫大になり、(少なくとも現在の 我々の知識では)ユニークな真空状態は決まらない。 その数は一説では10<sup>100</sup>個とも10<sup>500</sup>個とも言われてい る[2]。これら莫大な数の偽真空状態のうちいずれ かが我々の4次元宇宙を表す状態になっていると期 待される。ある種のインフレーション模型(永久イ ンフレーション)においては、インフレーションを 続ける宇宙全体の中に「ポケット宇宙」とでも言う



図1:永久インフレーションとポケット宇宙の概念図。緑 色の部分はインフレーションを起こしており、空間 的に増大している。一部の領域(図中ではオレンジ、 黄色、白色の領域)は量子的な相転移を起こすこと で永久インフレーションが終了し、ポケット宇宙を 生成する。ポケット宇宙内部でも量子的遷移を繰り 返すことで異なる状態に遷移している。



図2:量子的遷移を含むインフレーション模型のポテンシャ ルの概念図。



図3:CDL 量子的遷移を含む系におけるペンローズ図。

べき偽真空状態を無数に生成しうる。図1に永久イ ンフレーションとポケット宇宙の概念図を書いた。 宇宙全体はインフレーションを続けているのに対 し、一部は量子的遷移を起こすことで永久インフ レーションが終了し、ポケット宇宙を生成する。さ らにポケット宇宙内部でも量子的遷移により異なる 状態間を遷移することで全ての偽真空状態が宇宙全 体に渡って実現する。弦理論的宇宙論の文脈では、 これら永久インフレーションによって生じた無数の ポケット宇宙にスーパーストリング理論で現れる 10<sup>500</sup>個の真空状態があてはめられることになる。 よって、スーパーストリング理論は、異なる物理を 持つ非常に莫大な数の宇宙が同時に存在することを 予言する。このスーパーストリング理論が導く真空 |構造は景色(= ランドスケープ)に例えられ、特に「ス トリングランドスケープ | と呼ばれている [3]。

次に、ストリングランドスケープ描像において 我々の宇宙はどのように生成されると期待されるか について述べたい。既に述べたように、宇宙全体は 永久インフレーションを起こしており、量子的遷移 によってポケット宇宙を生成し続けている。また、 その中に存在する無数のポケット宇宙の間でも常に



図4:ストリングランドスケープにおける典型的な状況下 での宇宙マイクロ波背景輻射温度揺らぎの規格下さ れた角度相関関数。
ø\*および
øRはそれぞれ、量子 的遷移直後の場の配位および基準となる場の配位を 表す。

量子的遷移が起こっていると期待される。よって、 ストリングランドスケープの文脈では、我々のポ ケット宇宙は多くの量子的遷移の末に非常に小さい 真空のエネルギーを持つランドスケープの谷にたど り着いた偶然の産物であることを主張する。これら を踏まえると、我々の存在するポケット宇宙の周り の場の配位とポテンシャルエネルギーは図2のよう になることが期待される。

#### N. 観測に向けて

以上述べた来た弦理論的宇宙論、さらにはストリ ングランドスケープは非常に興味深く、全く新しい 宇宙像を提供してくれるが、当然ながら観測的な検 証が必要である。しかし、そもそもこの描像は原理 的に検証可能であるか、という疑問が浮かぶ。私を 含む共同研究グループでは、ストリングランドス ケープの観測可能性について研究を行い、量子的遷 移後のインフレーション期間がそれほど長くない場 合(e-fold 数で50~60程度)、観測可能なシグナル を与えることを示した。以下、それを具体的に見て いくことにする。

ストリングランドスケープ描像における最も重要 な宇宙論的示唆は、我々の宇宙では過去量子的遷移 が起こったということである。多くの場合、量子的 遷移は Coleman-de Luccia (CDL) インスタントンに よって記述されることが知られている [4]。CDL 量子的遷移によって生成される宇宙は、空間曲率が 負でからっぽの宇宙となってしまうことから、観測 と矛盾する。しかし、量子遷移後にインフレーショ ンを起こすことで適切に空間曲率を薄め、構造の種 を生成することで整合的な宇宙論を展開することが できる。CDL 量子遷移を含む系におけるペンロー



図5:宇宙マイクロ波背景輻射温度揺らぎの歪度 (3/5)  $f_{\rm NL} \equiv \langle (\delta T/T)^3 \rangle / \langle (\delta T/T)^2 \rangle^2$ の天球面における分布。 左上に円上をした "non-Gaussian bubble" を見ること ができる。

ズ図は、図3のようになる。図の下側の量子的遷移 面で CDL インスタントンと接続している。

以下では CDL 量子的遷移を含む系における CMB への影響を考察する。まず、量子的遷移とインフレー ションを同一のスカラー場が担っている場合を考え る。この場合、CDL インスタントンの整合性条件 から、量子的遷移後すぐさまインフレーションをス タートすることができず、スカラー場がポテンシャ ルを転がり落ちるフェーズが存在する。これまでの 研究の中では、このようなフェーズの影響は十分小 さいと考えられてきたが、ストリングランドスケー プの文脈においては重要になることを我々は指摘し た。スーパーストリング理論で自然に現れるポテン シャルの形を仮定した場合における CMB 温度揺ら ぎの角度相関関数を図4に示した。実際、量子遷移 後の転がり落ちるフェーズでのポテンシャルの詳細 によっては大スケール CMB スペクトルが大きく増 幅することを見ることができる [5]。この事実は既 に我々が CMB 観測を用いることで、我々のポケッ ト宇宙の周りのポテンシャルの情報を知る、ひいて はストリングランドスケープを観測的に検証しうる ことを表している。

次に、スカラー場が複数存在した場合を考える。 簡単のために一つの場 $\sigma$ が量子的遷移を担い、別の 場がインフレーションを引き起こしている場合を考 えよう。(複数場が引き起こす量子的遷移について は[6]を参照。)このような場合、 $\sigma$ 場は境界壁直 上において値が大きく変化することから、 $\sigma$ 場と結 合している他の場は量子的遷移の影響を色濃く受け てしまう。実際、 $\sigma$ と境界壁直上において別の場 $\phi$ と結合している状況を考えた場合、 $\phi$ 場は $\sigma$ 場の影 響を受け、相関関数に境界壁の影響が現れる。 $\phi$ 場 が CMB 温度揺らぎを支配的に生成しているような 場合には CMB 温度揺らぎの相関関数にその痕跡を 見ることができる[7]。図5に CMB 温度揺らぎの 3次の相関(歪度)の天球マップを示した。天球マッ プの左上に円上の歪度の高い部分を見ることができ る。境界壁にピークを持つような構造は単純な模型 では難しく、この "non-Gaussian bubble" は量子的遷 移の特徴的なシグナルの一つになりえると思われる。

#### V. 終わりに

現在宇宙論は、精密な観測および精緻な理論計算 に支えられた「標準宇宙論」が確立してきている。 その中でも、弦理論的宇宙論はいまだ発展途上の分 野であり、新たな模型、新たな概念が次々と提唱さ れ、非常にエキサイティングな時代に突入している と言える。標準宇宙論からのどんなに微小な差異で あったとしても、考察および検証により重要な発見 につながっていくと思われる。本稿では、その中で もストリングランドスケープに着目し、その観測可 能性を探ってきた。今後さらなる考察を加えること で、より精密に観測から制限を与えることができる と期待している。今後、素粒子論、宇宙論、観測、 実験とを組み合わせて考察することでスーパースト リング理論が導く新しい宇宙像を探求していきたい。

- S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde and S.P. Trivedi, "De Sitter vacua in string theory," Phys. Rev. D 68, 046005 (2003) [arXiv:hep-th/0301240].
- [2] 例えば、M.R. Douglas, JHEP 0305, 046 (2003) [hep-th/0303194].
- [3] 例 え ば、L. Susskind, "in Universe or Multiverse?", edited by B. Carr (Cambridge University Press, Cambridge, Eng-land, 2007)
- [4] S.R. Coleman, "The Fate Of The False Vacuum. 1. Semi- classical Theory," Phys. Rev. D 15, 2929 (1977) [Erratum- ibid. D 16, 1248 (1977)], S.R. Coleman and F. De Luccia, "Gravitational Effects On And Of Vacuum Decay," Phys. Rev. D 21, 3305 (1980).
- [5] D. Yamauchi, A. Linde, A. Naruko, M. Sasaki and T. Tanaka, Phys. Rev. D 84, 043513 (2011) [arXiv:1105.2674 [hep-th]].
- [6] K. Sugimura, D. Yamauchi and M. Sasaki, JCAP 1201, 027 (2012) [arXiv:1110.4773 [gr-qc]].
- [7] K. Sugimura, D. Yamauchi and M. Sasaki, arXiv:1208. 3937 [astro-ph. CO].

	А	事   異	動
発 令 日	氏名	異動内容	職
H24. 12. 1	沖 中 美保子	新規採用	学術支援職員
H24. 12. 1	川 上 亜希子	新規採用	学術支援職員
H24. 12. 15	山 口 明 子	辞職	事務補佐員
H24. 12. 17	米 澤 佳 子	新規採用	事務補佐員

(H24.12.1~H24.12.31)

#### 訂正とお詫び

ICRR ニュース No.82「柏キャンパス一般公開2012のご報告」に一部誤りがございました。ここにお詫びし て訂正させていただきます。



