



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22年度宇宙線研究所共同利用研究成果発表会報告	吉越 貴紀	1
アクション・ストリングからのアクション放出	川崎 雅裕	9
人事異動		12
ICRR-Seminar		12
ICRR-Report		12

## 研究紹介

### 平成22年度宇宙線研究所共同利用研究成果発表会報告

吉越 貴紀

【東京大学宇宙線研究所】

平成22年度の共同利用研究成果発表会が、平成22年12月17日(金)と18日(土)の2日間に渡って宇宙線研究所大セミナー室で開催された。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43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5

件の報告もまとめて行われた。発表会はおよそ100名の参加を得、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/2010/kyodoriyo/Program\\_H22.html](http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/infomation/workshop/2010/kyodoriyo/Program_H22.html)

### 平成22年度宇宙線研究所共同利用研究成果発表会プログラム

12月17日(金)

開始時間	講演時間	講演者	講演題目
10:00	5分	梶田隆章 (宇宙線研究所)	開会の挨拶
10:05	15分	大橋英雄 (東京海洋大学)	地下実験室の環境連続計測/天然放射性核種 <sup>7</sup> Be、 <sup>210</sup> Pb 降下量の季節変動に関する研究

10:20	15分	福岡孝昭 (立正大学)	南極宇宙塵の化学的研究／南極隕石の <sup>26</sup> Al 放射能の測定
10:35	15分	櫻井敬久 (山形大学)	Be-7などによる宇宙線強度時間変化の検出／年輪中の放射線炭素測定と微量放射性同位元素分析による過去の宇宙線強度変動の研究
10:50	15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
11:05	15分	高橋耕一 (信州大学)	乗鞍岳の高山帯の植生調査
11:20	15分	丸田恵美子 (東邦大学)	高山植物の生理生態的機能と環境形成作用
11:35	15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
11:50	15分	宗像一起 (信州大学)	乗鞍岳におけるミューオン強度の精密観測／スーパーカミオカンデによる10TeV 宇宙線強度の恒星時日周変動の観測
12:05	60分		休憩
13:05	15分	寺澤敏夫 (宇宙線研究所)	粒子加速機構：1次加速過程・2次加速過程の比較研究
13:20	15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
13:35	15分	土屋晴文 (理化学研究所)	雷や雷雲からのX線・ $\gamma$ 線を利用した電場による粒子加速の検証
13:50	15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
14:05	15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
14:20	15分	川崎雅裕 (宇宙線研究所)	宇宙の進化と素粒子模型
14:35	15分	間瀬圭一 (千葉大学)	IceCube 宇宙ニュートリノ観測実験のためのシミュレーション研究
14:50	25分	坂下健 (高エネルギー加速器研究機構)	T2K 実験
15:15	15分		休憩
15:30	15分	塩澤真人 (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
15:45	15分	身内賢太郎 (京都大学)	ガス飛跡検出器による方向に感度を持つ暗黒物質探索実験
16:00	15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
16:15	20分	小川洋 (宇宙線研究所)	XMASS 実験
16:35	15分	中村正吾 (横浜国立大学)	液体キセノンの発光スペクトルの研究
16:50	15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
17:05	20分	西嶋恭司 (東海大学)	研究会報告

12月18日(土)

開始時間	講演時間	講演者	講演題目
9:00	25分	梶裕志 (宇宙線研究所)	スーパーカミオカンデ実験
9:25	15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
9:40	15分	吉田健二 (芝浦工業大学)	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
9:55	15分	田村忠久 (神奈川大学)	長期間気球観測による高エネルギー宇宙線加速天体の研究
10:10	15分	河合誠之 (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
10:25	15分		休憩
10:40	20分	谷森達 (京都大学)	カンガルー実験
11:00	20分	戸谷友則 (京都大学)	CTA 計画日本コンソーシアム立ち上げのための基礎研究
11:20	15分	西嶋恭司 (東海大学)	次世代大気チェレンコフ望遠鏡のための新しいフォトン検出器の開発
11:35	15分	山本常夏 (甲南大学)	Auger 計画の最高エネルギー宇宙線データの解析Ⅲ
11:50	15分	榊直人 (青山学院大学)	高山における大気発光現象と雲による反射、散乱の測定
12:05	60分		休憩
13:05	30分	竹田成宏 (宇宙線研究所)	テレスコープアレイ実験
13:35	15分	増田公明 (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
13:50	20分	浅岡陽一 (宇宙線研究所)	全天高精度素粒子望遠鏡計画 Ashra 観測
14:10	25分	日比野欣也 (神奈川大学)	チベット高原での高エネルギー宇宙線の研究
14:35	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
14:55	20分	黒田和明 (宇宙線研究所)	大型低温重力波望遠鏡の開発・設計 (Ⅻ)
15:15	15分		休憩
15:30	25分	井戸哲也(情報通信研究機構)	神岡での重力波観測 (Ⅸ)
15:55	15分	森井互 (京都大学)	レーザー伸縮計と超伝導重力計の同時観測による地球の固有振動の研究
16:10	15分	福田善之 (宮城教育大学)	低エネルギー太陽ニュートリノ観測を目的としたインジウム・リン半導体検出器の開発研究
16:25	15分	梅原さおり (大阪大学)	$^{48}\text{Ca}$ の二重ベータ崩壊の研究
16:40	15分	本田守広 (東海大学)	大気ニュートリノフラックスの精密計算
16:55	5分	西嶋恭司 (東海大学)	閉会の挨拶

## 1. 大橋英雄 (東京海洋大学)

「地下実験室の環境連続計測／天然放射性核種<sup>7</sup>Be、<sup>210</sup>Pb 降下量の季節変動に関する研究」

地下実験室：毎年停電後にデータロガーのトラブルが発生し、かなりの期間欠測している。メーカーも製造完了しており、担当者も退職したので次の対策を考えておく必要がある。液体窒素運搬容器は昨年の経費で転倒しにくい物を業者と打合せて開発した。

天然核種：降雨中の天然核種を地下実験室の $\gamma$ 線検出器で測定している。両核種とも降雨量依存性が強いが、<sup>7</sup>Beでは春秋に降下量が多く、夏冬に少ない。一方<sup>210</sup>Pbは起源が異なり、高度分布も全く一致しないが、季節・降雨量に関わらず相関が強い事から、吸着されるエアロゾルの粒径等、大気中での挙動が似ていると考えられる。

## 2. 福岡孝昭 (立正大学)

「南極宇宙塵の化学的研究／南極隕石の<sup>26</sup>Al 放射能の測定」

南極ドーム Fuji 氷床コア掘削時に生じた切削氷(1,700m深)から、目視できる宇宙塵粒子が見つからなかった。孔径8.0、0.8、0.2 $\mu$ mのフィルターごと分析したところ、宇宙起源元素であるIrが検出された。その含有量から宇宙塵降下量0.12x10<sup>3</sup>ton/年が求まった。同様な方法で求めた文献値と一致するが、粒子重量から求めた降下量とは一致しない。

南極やまと隕石の<sup>26</sup>Al 放射能を地下測定施設で引き続き測定している。

## 3. 櫻井敬久 (山形大学)

「<sup>7</sup>Beなどによる宇宙線強度時間変化の検出／年輪中の放射線炭素測定と微量放射性同位元素分析による過去の宇宙線強度変動の研究」

2000年から11年間の大気中宇宙線生成核種<sup>7</sup>Be濃度変動及びアイスランド、チャカルタヤでの測定結果と太陽活動、大気運動の関連について報告した。また、古木年輪中の微弱放射性同位元素の測定について報告した。

## 4. 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」

樹木年輪および氷床コア中の宇宙線生成核種の変動により、マウンダー極小期における宇宙線変動の特性が明らかになってきた。気候復元データとの対

比により、宇宙線が気候変動に重要な役割を果たしている可能性が高いことも示された。

## 5. 高橋耕一 (信州大学)

「乗鞍岳の高山帯の植生調査」

高山植物の種多様性の維持機構を明らかにするために、種ごとの分布パターンを土壌養分や水分などの環境条件から調べた。その結果、高山植物は7群集に区分でき、土壌養分や水分条件に応じて分布していることが分かった。

## 6. 丸田恵美子 (東邦大学)

「高山植物の生理生態的機能と環境形成作用」

乗鞍岳の森林限界(標高2,500m)を形成しているオオシラビソ(*Abies mariesii*) 個体群の樹齢は最大190年から若い個体までほぼ均等に分布していた。幹の肥大成長は2010年の夏の高温によって増加した結果とあわせると、温暖化によって森林限界は上昇すると予測される。

## 7. 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」

2009年に引き続き、中緯度の高地に位置する乗鞍観測所においてオゾン・紫外線の観測を試みた。その結果、乗鞍のオゾン全量はつくばより低い値で推移し、晴天時の紫外線量は非常に多いこと等が明らかとなった。

## 8. 宗像一起 (信州大学)

「乗鞍岳におけるミューオン強度の精密観測／スーパーカミオカンデによる10TeV 宇宙線強度の恒星時日周変動の観測」

GMDNにより、2006年12月のイベントの宇宙線前兆現象がSSCに24時間以上先行して観測された。一方、昨冬の大雪の重みにより乗鞍太陽電池パネル架台が変形するという障害が発生した。2011年度夏季に対策を講じる。TibetとIceCubeによる観測結果から恒星時異方性の南北両半球マップを作成し、両観測結果の間に良い一致が見られることを確認した。

## 9. 寺澤敏夫 (宇宙線研究所)

「粒子加速機構：1次加速過程・2次加速過程の比較研究」

粒子加速機構について、衝撃波加速標準理論の枠を越えた新しい発展をめざしている。研究会では共

同研究メンバー (Scholer、Lee 両客員教授を含む) と行った広範な理論的検討の結果を紹介した。

## 10. 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、自然エネルギーでの安定した電力供給が肝要である。本年度は新しい風力発電の設置、バッテリー充電及び夏期の一部 AC100V 利用化を行った。太陽活動そのものはまだ活発ではなく、2013年頃に極大となることが期待される。

## 11. 土屋晴文 (理化学研究所)

「雷や雷雲からの X 線・ $\gamma$  線を利用した電場による粒子加速の検証」

今年度は、2台体制で観測を行った。その結果、雷雲からの長いガンマ線バーストは観測されなかったが、雷に付随する短いガンマ線バーストと思われるイベントを取得した。現在、解析中である。

## 12. 小島浩司 (愛知工業大学)

「大型ミュオンテレスコープによる銀河宇宙線強度の観測」

明野観測所及び GRAPES 3 でのミュオン強度の同時観測は「太陽面フレアなど起因する太陽風衝撃波の到来予想」を目的として観測を続けている。

2010年度は、M5ステーションはほぼ80%程度の期間稼働したが、機器の経年劣化等により M8ステーションでは30%程度の期間の稼働、M1ステーションでは全期間に亘り稼働できなかった。現在、電子回路のオーバーホール及び記録用 PC の交換と比例計数管のメンテナンス等の対策を講じて、太陽活動の増加に備えている。

## 13. 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」

甲南大学所有の大気チェレンコフ望遠鏡を譲り受け、駆動制御可能な状態まで改修した後、2010年11月に明野観測所へ移設した。この望遠鏡は国内唯一の大気チェレンコフ望遠鏡であり、次世代地上ガンマ線天文台計画の試験用望遠鏡として利用される。

## 14. 川崎雅裕 (宇宙線研究所)

「宇宙の進化と素粒子模型」

強い相互作用の CP 問題を解決するために導入さ

れるアクシオンの宇宙論的進化に伴って生成する位相欠陥 (ストリング、ドメイン・ウォール) のシミュレーションを行い、ストリングから生成されるアクシオンの正確なエネルギースペクトルを計算し、また、ドメイン・ウォールの崩壊過程を詳しく調べた。

## 15. 間瀬圭一 (千葉大学)

「IceCube 宇宙ニュートリノ観測実験のためのシミュレーション研究」

南極氷河中で高エネルギーニュートリノを観測する IceCube 望遠鏡は今年度完成を迎えた。この IceCube 望遠鏡を用いて  $10^6$  GeV 以上の超高エネルギーニュートリノを探索した結果を発表した。宇宙線研究所で作られたバックグラウンドシミュレーションは観測と合い、探索の重要な部分を担っている。

## 16. 坂下健 (高エネルギー加速器研究機構)

「T2K 実験」

東海—神岡間長基線ニュートリノ振動実験 (T2K 実験) では、電子ニュートリノの出現事象の発見を目指している。実験の準備が終わり、2010年からデータ収集をスタートした。講演では、実験の概要と現状について報告した。

## 17. 塩澤真人 (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」

地質調査や初期応力測定等の候補地周辺の調査と共に、空洞の形、レイアウトや掘削方法検討、水槽建設方法の検討、センサーの数や純水製造システム設計等、計画全体の設計や工期と費用の見積もりを進めている。また project を世界に発信すべく、上記地質調査や各設計、物理感度研究の結果を Neutrino Conference (アテネ) や NNN Workshop (富山) で報告した。

## 18. 身内賢太郎 (京都大学)

「ガス飛跡検出器による方向に感度を持つ暗黒物質探索実験」

独自開発の「マイクロ TPC」を用いた方向に感度を持つ暗黒物質探索実験「NEWAGE」の神岡地下実験室での first result を Physics Letters B 686 (2010) 11として出版した。ラドン及び $\gamma$ 線への対策を行い、暗黒物質測定を約半年行った。その後、検出器構成材料を低バックグラウンド材料のものに変更、調整を行っている。

## 19. 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」

神岡鉱山内に設置した高感度地震計、地殻変動・地下水観測装置等のデータを、神岡宇宙素粒子研究施設のネットワーク回線の一部を利用して、リアルタイム伝送し、跡津川断層を中心とする中部日本の地震活動や地殻活動のモニターを行った。

## 20. 小川洋 (宇宙線研究所)

「XMASS 実験」

XMASS 実験は液体キセノンを用いた、多目的低バックグラウンド検出器である。暗黒物質探索を主目的としており、1年の運転で $2 \times 10^{-45} \text{cm}^2$ の検出感度の達成を目指す。

2009年から2010年にかけて検出器の製作、建設が進められた。現在は液体キセノンを検出器に導入し、検出器の調整を実施しているところである。本発表では、検出器の概要、検出器の製作と建設、現状を報告する。

## 21. 中村正吾 (横浜国立大学)

「液体キセノンの発光スペクトルの研究」

液体キセノンの発光波長を、光子同時計数法により精度1nm以下で決定する実験を進めている。約1気圧の気液平衡状態において、preliminaryであるが、中心波長で約175nm、FWHMが約10nmという初期の結果を得た。

## 22. 田阪茂樹 (岐阜大学)

「極低濃度ラドン測定システムの開発」

本研究は、スーパーカミオカンデ実験の純水タンク中極低ラドン濃度測定システムを開発して、タンク内の有効体積内部のラドン起源バックグラウンドの解明と低減を目的とする。平成22年度の測定結果は、SK純水装置からの「送り水」の純水中ラドン濃度は $1.0 \pm 0.2$  (mBq/m<sup>3</sup>)となった。また、SK外水槽の中心部の深度10メートルの純水中ラドン濃度は、 $0.82 \pm 0.20$  (mBq/m<sup>3</sup>)となった。

## 23. 梶裕志 (宇宙線研究所)

「スーパーカミオカンデ実験」

SK run-IVは順調であり、本年は太陽、大気ν解析とも最初の結果を発表した。またSK-I、II、IIIデータを精密解析し、未測定振動パラメータ $\theta_{13}$ 、 $\delta_{CP}$ の研究結果を発表した。ガドリニウムテス

ト実験タンク、純水システムが導入され、2011年はガドリニウム導入試験を行う。

## 24. 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」

地下環境ラドン、平衡ファクタFの測定、解析が目的。①F=0.1~0.2の存在を実証。②環境条件により濃度は3桁範囲で変動。③散逸率に大きな地域分布の可能性。④実効線量は低く、作業環境管理は十分。

## 25. 吉田健二 (芝浦工業大学)

「エマルジョンチェンバーによる高エネルギー宇宙線電子の観測」

イルフォードG5原子核乾板にβ線源を照射したところ電子飛跡がほとんど記録されず、ECC電子観測への使用が困難であると結論付けた。また、大気電子スペクトルを精密化し未発表のECC気球実験データを加え、最終的な宇宙線電子エネルギースペクトルを導出した。

## 26. 田村忠久 (神奈川大学)

「長期間気球観測による高エネルギー宇宙線加速天体の研究」

超新星爆発などで加速される高エネルギー電子の観測と宇宙線が大気中で生成する大気ガンマ線の観測を、国際宇宙ステーションに搭載予定のCALET (Calorimetric Electron Telescope)のプロトタイプにより行っている。

## 27. 河合誠之 (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」

明野観測所にて口径50cmの望遠鏡を設置し、ガンマ線バーストおよびブレーザーやX線連星などの高エネルギー天体のg'、Rc、Icの3バンド同時撮像観測を行っている。2010年は4個のGRBの観測を実施し、そのうち2個で残光検出に成功した。その一つGRB100219Aはz=4.7という今までに明野で観測したうちの最高の赤方偏移をもつ。また、30個のブレーザーに加え、新発見されたブラックホール連星MAXI J1659-152の連続観測を行った。

## 28. 谷森達 (京都大学)

「カンガルー実験」

22年度は、6回の観測を行い、大マゼラン雲、望

遠鏡経年変化評価のためのカニ星雲などの観測を行った。また10年にわたる CANGAROO-III の観測データから望遠鏡の経年変化の解析、未発表データの解析の推進を進め、成果の総括に向けて整備を開始した。さらに望遠鏡の再利用または撤去への具体的な協議を宇宙線研、オーストラリアと開始した。23年度に具体的な方針を示したい。

### 29. 戸谷友則 (京都大学)

「CTA 計画日本コンソーシアム立ち上げのための基礎研究」

CTA Japan は総勢50名以上のメンバーが参加し、活発な活動を始めている。特に、大サイズ望遠鏡の開発において日本が積極的な役割を果たすべく、望遠鏡の試作準備や電子回路、焦点面検出器などの開発研究を進め、CTA 全体でも存在感を発揮しつつある。多くの理論家の参加により、サイエンス検討もいくつかのトピックで世界をリードしている。

### 30. 西嶋恭司 (東海大学)

「次世代大気チェレンコフ望遠鏡のための新しいフォトン検出器の開発」

3mmx3mm MPPC の2x2モノリシックアレイの基礎特性を試験し、ゲインのバイアス電圧特性と温度特性を調べた。4x4アレイの特性試験もほぼ終え、夜光の暴露試験を継続中である。一方高速読み出し回路は SPIROC-A チップを用いた試験を予定しており、現在入手手続き中である。

### 31. 山本常夏 (甲南大学)

「Auger 計画の最高エネルギー宇宙線データの解析Ⅲ」

南 Auger 観測所により収集されたデータを自動解析するシステムを宇宙線研の CPU クラスタを利用し開発した。解析システムは完成し、一日一回解析結果を実験グループにメールで自動的に送信している。

### 32. 榊直人 (青山学院大学)

「高山における大気発光現象と雲による反射、散乱の測定」

JEM-EUSO ミッションにおける雲上での夜光量を見積もるために乗鞍観測所において300-400nm帯の夜光観測を継続しているが今年も含め天候が悪い日が多く十分な観測時間が得られていない。観測時間を稼ぐために装置の自動化などを検討している。

### 33. 竹田成宏 (宇宙線研究所)

「テレスコープアレイ実験」

TA 実験装置の安定運用を通して蓄積されたデータをもとに、エネルギースペクトル (ハイブリッドおよび SD 単独)・FD ステレオ観測による Xmax 測定を通じた組成研究・SD 観測による到来方向分布の解析が進んでいる。また、FD-SD 間ハイブリッドトリガーシステムが導入された。さらに、エネルギー絶対値較正のための電子加速器の初射出も行われた。

### 34. 増田公明 (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」

CERN/LHC 加速器が稼働を始め、2009年11月から450GeV、2010年2月から3.5TeVのビームの衝突実験が行われた。LHCf実験でもデータを取得し、解析中である。超高エネルギー宇宙線に関するハドロン相互作用モデルの構築を目指して2011年3月にTA等宇宙線観測グループとのデータ検討会を行う。

### 35. 浅岡陽一 (宇宙線研究所)

「全天高精度素粒子望遠鏡計画 Ashra 観測」

Ashra 実験では、計3,500時間を越える定常観測データを蓄積した。観測データを用いて、GR-B100906A のプロンプト光学放射探索等を行っている。

### 36. 日比野欣也 (神奈川大学)

「チベット高原での高エネルギー宇宙線の研究」

2010年度のチベット空気シャワー実験は、2007年度に建設したミュオン検出のための地下水チェレンコフ検出器 (プロトタイプ MD 検出器) の実績を基に、大型 MD 検出器 4 台 (1 台約820平米、合計約3,300平米) の建設を開始した。2011年度夏頃には完成し、空気シャワーアレイとの連動観測に入る予定である。

### 37. 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」

ボリビア・チャカルタヤ山の標高5,200mにおいて、600mX700mの新空気シャワーアレイを建設した。ケーブル張り替えやCAMACデータ収集系のフィックスが完了し、定常運転が続いている。

### 38. 黒田和明 (宇宙線研究所)

「大型低温重力波望遠鏡の開発・設計 (XII)」

本共同利用研究の遂行中に、LCGT の建設予算の一部が認められたことにより、当初の研究計画を早めて LCGT 建設に着手した。ここでは、1) 予算の一部が認められる以前に検討してきた結果を反映させる設計に従って建設計画を策定し、2) 建設組織の再編、特にサブワーキンググループの再構築を進め、LCGT 建設に特化した組織体制を完成させ、3) 建設の進捗状況について報告した。

### 39. 井戸哲也 (情報通信研究機構)

「神岡での重力波観測 (IX)」

神岡施設における重力波グループの共同利用研究の現状を報告した。まず、CLIO の最新感度を報告し、H22年度に開始した低振動環境に光共振器を設置して従来にない狭線幅連続波光源を実現する実験について計画概要を紹介した。

### 40. 森井互 (京都大学)

「レーザー伸縮計と超伝導重力計の同時観測による地球の固有振動の研究」

地震が発生していない静穏時には、3,600秒未満の帯域で歪記録と気圧計記録双方のスペクトル・ピークは地球自由振動の固有周期に一致するものも含めてほぼ全てが対応していた。これは、常時地球自由振動の励起源解明の糸口になると考えられる。

### 41. 福田善之 (宮城教育大学)

「低エネルギー太陽ニュートリノ観測を目的としたインジウム・リン半導体検出器の開発研究」

本年度は、液体キセノンのシンチレーション光を InP 検出器で観測するために薄膜電極の検出器を開発し、放射線源 ( $\gamma$  線) による応答性の観測と、CsI を用いたシンチレーション光の観測を行った。

### 42. 梅原さおり (大阪大学)

「 $^{48}\text{Ca}$  の二重ベータ崩壊の研究」

$^{48}\text{Ca}$  の二重ベータ崩壊の測定のために、CAN-DLES システムの開発を進めている。本年度は、神岡地下実験室への検出器移設を進める他、バックグラウンド調査のための各種テスト測定を行った。また、測定高感度化のための  $^{48}\text{Ca}$  濃縮の研究を進めた。

### 43. 本田守広 (東海大学)

「大気ニュートリノフラックスの精密計算」

PHITS 相互作用モデルを取り入れて、大気ニュートリノフラックスの計算を行った。PHITS 相互作用モデルでは、低エネルギー ( $< 1 \text{ GeV}$ ) の大気ニュートリノのフラックスと良い相関を示す、上空の大気ミューオンの観測を良く再現でき、低エネルギーの大気ニュートリノのフラックスにたいして、0.3 GeV で、15%、0.1 GeV で、20% 程度に抑えることができたと考えている。



研究紹介

# アクシオン・ストリングからのアクシオン放出

川崎 雅裕

【東京大学宇宙線研究所】

## 1. アクシオン

カラーを持つ素粒子であるクォークやグルーオンの中に働く強い相互作用を記述する量子色力学(QCD)は電弱相互作用を記述するワインバーグ・サラム理論と並んで現在の素粒子の標準理論の重要な構成要素となっている。QCDのラグランジアンには次のようなCP(C:荷電反転、P:空間反転)を破る項が許される。

$$L = L_{\theta=0} + \frac{\theta}{32\pi^2} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a,\mu\nu} \quad (1)$$

ここで、 $G_{\mu\nu}^a$ はグルーオン場の強さで、 $\tilde{G}^{a,\mu\nu} = \epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} G_{\alpha\beta}^a$ 、 $\theta$ は理論のパラメータでCPの破れの大きさを決めている。しかし、実験的には強い相互作用でCPを破る現象は見つかっておらず、中性子の電気双極子を計る実験から、CPの破れを表すパラメータ $\theta$ に $\theta \leq 10^{-9}$ という厳しい制限が得られている。つまり、QCDはCPを非常に高い精度で保存していなければならない。しかし、QCD自体にはCPを破る項を禁止する理由がなく、 $\theta$ が非常に小さいことは不自然である。これが有名なストロングCP問題である。

このストリングCP問題のほぼ唯一の解決策として考えられているのがPeccei-Quinn機構と呼ばれるものである。これはCPの破れの大きさを表すパラメータであった $\theta$ を力学的な自由度(具体的にはスカラー場)と見なし、 $\theta = 0$ がスカラー場のポテンシャルを最小にする解として得られるというアイデアである。これを実現するために $U(1)_{PQ}$ 対称性を持つ複素スカラー場 $\Phi(x)$ (PQ場と呼ぶことにする)が導入される。この新しい $U(1)_{PQ}$ はグローバルな対称性(変換が座標 $x$ によらない)で、あるスケール $F_a$ で自発的に破れ、その際に生成される南部・ゴールドストーン粒子がアクシオン $a$ である。アクシオン場 $a$ と $\theta$ は $a = F_a\theta$ という関係があり、アクシオン場はQCDスケールでインスタントン効果によって図1のポテンシャルを獲得し、 $\theta = a/F_a = 0$ でポテンシャルが最小になる。

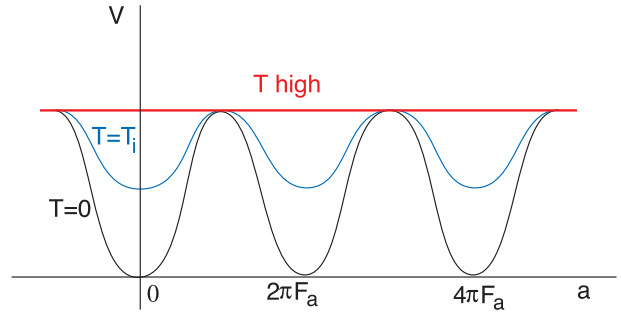


図1: アクシオンのポテンシャル

## 2. アクシオンの宇宙論的進化

PQ場とアクシオン場の宇宙論的進化を考えると、様々な現象が起き、非常に興味深いことがわかる[1]。まず、 $U(1)_{PQ}$ 対称性を持つPQ場は宇宙初期において、 $F_a$ より温度の高いときには有限温度の効果によって $\Phi = 0$ でポテンシャル最小となり、 $U(1)_{PQ}$ 対称性が回復している(図2の赤線)。しかし、宇宙の温度が下がるにつれて有限温度の効果は弱まり、図2の青線で表されるようにワイン・ボトム(ワイン・ボトム)の形となり、 $\Phi = F_a$ で最小となる。PQ場 $\Phi$ が有限の期待値を持つことによって、 $U(1)_{PQ}$ 対称性は自発的に破れ、南部・ゴールドストーン場であるアクシオン場が生成される。アクシオン場はPQ場の位相方向の自由度に対応し、ポテンシャルが $\Phi$ の位

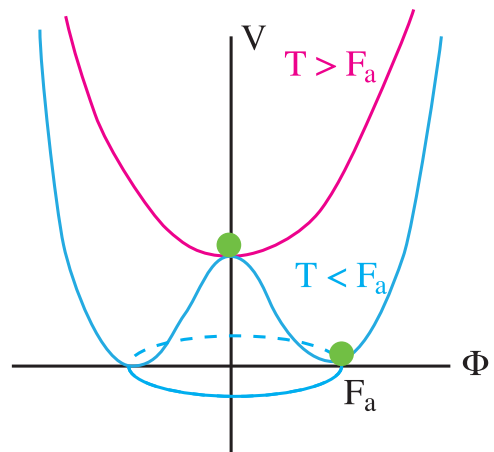


図2: PQスカラーのポテンシャル

相に依らないことから明らかなように質量はゼロである。

$U(1)_{PQ}$  対称性が破れ PQ 場が  $|\Phi| = F_a$  という期待値を獲得するとき、因果律から PQ 場の位相は宇宙全体である決まった値をとるわけではなく、宇宙の場所場所で勝手な値をとることができる。その結果、空間のある点に着目したときその回りの円周でたまたま位相が 0 から  $2\pi$  まで変化するようなことが起こる。この円周をどんどん小さくしていく極限を考えると位相が決まらない点が存在することがわかる。そこでは位相が定義できない、つまり  $\Phi = 0$  が実現されていなければならず、ポテンシャルエネルギーが高くなる。このような点は 1 次元的につながっていて宇宙に紐状のエネルギーの高い物体ができることが分かる。このように紐状のエネルギーを持った物体をコスミック・ストリングと呼び、対称性の破れに伴って一般に生じる位相欠陥の一つである。したがって、ストロング CP 問題を解決する Peccei-Quinn 機構では必然的にコスミック・ストリングが生成されるのである。Peccei-Quinn 機構で生じるコスミック・ストリングはアクシオン・ストリングと呼ばれる。

その後、宇宙の温度がさらに低くなり QCD スケール ( $\sim 1 \text{ GeV}$ ) になると、先に述べたように QCD インスタントン効果により、それまで平坦だったアクシオン場 (PQ 場の位相方向) にポテンシャルが生じ、アクシオン場は  $a = 0$  に向かって運動を始める。この運動はポテンシャルの最小付近のコヒーレントな振動となり、そのエネルギーは現在の宇宙の密度パラメータで

$$\Omega_a \approx 0.4 \left( \frac{F_a}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{1.19} \quad (2)$$

になる。現在の宇宙の暗黒物質量は  $\Omega \approx 0.22$  に相当するので、アクシオンの振動は宇宙の暗黒物質を説明するに十分な量になっている。

さらに、アクシオンがポテンシャルを獲得する際にはもう一つの位相欠陥であるドメイン・ウォールが生成する。これは理論が持つ離散的な対称性 (図 1 に見られるようにポテンシャルが最小となる  $a$  が離散的に複数存在する) が自発的に壊れるため、元々ストリングがあるので生成されるドメイン・ウォールは端がストリングになっている特殊なものである。ドメイン・ウォールの進化はアクシオンのモデルによって異なるが最も簡単なモデルでは生成されるドメイン・ウォールは円盤状で縁がストリングになっている。このようなドメイン・ウォールは

その張力によって潰れ、ストリングと共に宇宙から消える。

### 3. アクシオン・ストリング

Peccei-Quinn 機構で生成されるアクシオン・ストリングは  $U(1)_{PQ}$  対称性の破れが起きた時には非常に高い密度を持つが、ストリング同士が衝突して組み替えが起こり、それによって小さなループ状のストリングが生成されるプロセス、さらに、アクシオンを放出してエネルギーを失うプロセスによって、その数は減少する。図 3 はアクシオン・ストリングの進化のシミュレーション結果 [2] で最初たくさんあったストリングがだんだん減少していく様子分かる。そして、アクシオン・ストリングのネットワークは急速にスケーリング解という振る舞いに近づいていく。スケーリング解というのは宇宙のホライズン体積あたりに約一本のコスミック・ストリングが存在するというもので、実際に図 3 のシミュレーションから宇宙時間  $t$  の 3 乗の体積 ( $=t^3$ ) の中に平均して  $0.87 \pm 0.14$  本のストリングがあることが導かれる。

コスミック・ストリングのネットワークがスケーリング解に従って進化するためにはストリングが持つエネルギーを常に放出していかなければならない。アクシオン・ストリングの場合には主にアクシオンを放出することによってエネルギーを失っていく。これは宇宙の温度が QCD スケールに下がるまではアクシオンの質量はゼロなので、ストリングの

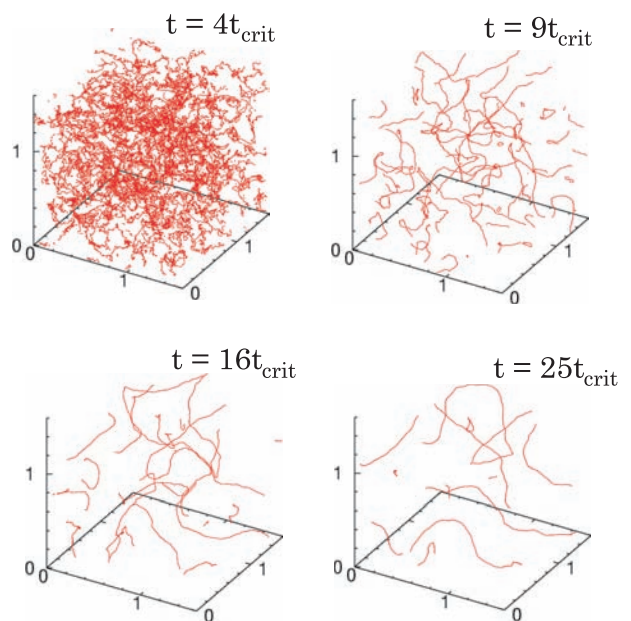


図 3 : アクシオン・ストリングの進化。  $t$  は時間で  $t_{\text{crit}}$  はストリングが生成された時刻。

運動によってアクシオンが容易に励起されるためである。したがって、この過程によるアクシオン放出はQCDスケールまで続き、放出されたアクシオンは最終的に質量を獲得し宇宙の密度に寄与する。

ストリングから放出されたアクシオンが現在の宇宙の物質密度のどれだけの割合を占めるのかを定量的に評価するためには、ストリングから放出されるアクシオンのエネルギー・スペクトルを知る必要がある。もし、合計の放出エネルギー量が一定であれば、エネルギーの高いアクシオンが放出されれば、そうでない場合に比較して放出されるアクシオンの数が少なくなる。その後の宇宙膨張のため現在のアクシオンの運動エネルギーは質量に比べて無視できるので最終的なアクシオン密度は（アクシオンの質量） $\times$ （アクシオンの数密度）となり、エネルギーの高いアクシオンが放出された方が現在での宇宙密度は小さくなる。

このアクシオンのエネルギー・スペクトルに関しては20年以上もの長い間続く論争がある。Deivis と Shellard はエネルギー・スペクトルはアクシオンが放出された時のホライズンの大きさに対応する波数のところに鋭いピークがあり、エネルギーの高いところは指数関数的に減少すると主張し [3]、Sikivie 達は波数の逆数に比例すると主張している [4]。この問題に対して、図3で示した最新のシミュレーションからアクシオンのエネルギー・スペクトルを求めると図4のようになる。図から分かるように、スペクトルは波数の小さいところにピークを持ち波数の大ききところでは指数関数的に減少している。つまりこの結果は Deivis と Shellard の主張と一致するものである。したがって、アクシオン・ストリングから放出されるアクシオンはエネルギーの低いものが支配的であり、その分多く数のアクシオンが生成されることになる。

シミュレーション結果を用いてストリングから放出されるアクシオンの現在の宇宙における密度を求めると

$$\Omega_a(\text{string}) = (3.2 \pm 0.5) \left( \frac{F_a}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{1.19} \quad (3)$$

となる。これは、コヒーレントな振動によるアクシオンの密度 [式(2)] より大きく、ストリング起源のアクシオンが重要であることが分かる。

#### 4. まとめ

QCD のストロング CP 問題を解決する Peccei-

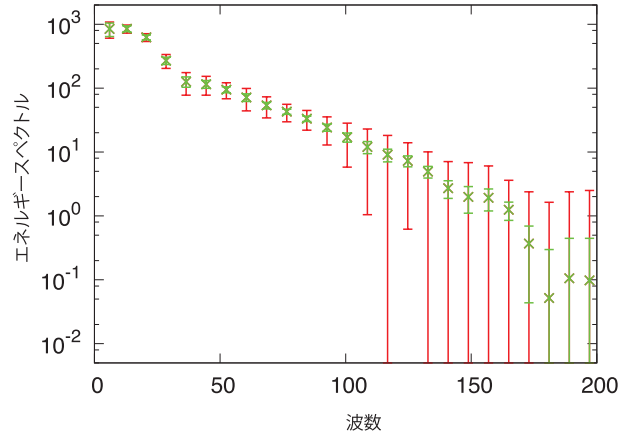


図4：放出されたアクシオンのエネルギー・スペクトル。  
緑は統計エラーのみで赤は系統誤差を含む。

Quinn 機構で予言されるアクシオンは現在の宇宙の約20%を占める暗黒物質の有力な候補の一つとして注目されてきた。アクシオンモデルでは宇宙の進化の過程でストリングやドメイン・ウォールが生成される。ここでは、アクシオン・ストリングからのアクシオン放出に着目し、シミュレーションによってストリング・ネットワークの進化を調べることによって、放出されるアクシオンのエネルギー・スペクトルを求め、それを使ってストリング起源のアクシオン宇宙における密度を評価した。結果として、ストリング起源のアクシオンはこれまで暗黒物質として議論されてきたコヒーレント振動起源のアクシオンと同等以上の寄与をすることが分かった。ただし、この結論の前提として  $U(1)_{PQ}$  対称性がインフレーションの後で自発的に破れることが仮定されている。もし、インフレーション以前に対称性が破れストリングが作られたとするとインフレーションで薄められてしまい無視できる。どちらが実現するかはインフレーションとアクシオンの両方のモデルに依るのでどちらの場合も十分にあり得る。

#### 参考文献

- [1] レビューとして例えば、P. Sikivie, Lect. Notes Phys. 741, 19-50 (2008). [astro-ph/0610440].
- [2] T. Hiramatsu, M. Kawasaki, T. Sekiguchi, M. Yamaguchi, J. Yokoyama, [arXiv: 1012. 5502 [hep-ph]].
- [3] R.L. Davis and E.P.S. Shellard, Nucl. Phys. B 324, 167 (1989).
- [4] D. Harari and P. Sikivie, Phys. Lett. B 195, 361 (1987).

## 人 事 異 動

発令日	氏名	異動内容	職
H23. 2. 28	野中敏幸	辞職	特任助教
H23. 3. 1	野中敏幸	新規採用	助教

### ICRR-Seminar 2010年度

2011年2月2日(水) 片岡 淳(早稲田大学)  
 “活動銀河ジェットからの高エネルギー放射：最近の進展”

### ICRR-Report 2010年度

ICRR-Report-578-2010-11  
 “Destruction of  ${}^7\text{Be}$  in big bang nucleosynthesis via long-lived sub-strongly interacting massive particles as a solution to the Li problem”  
 Masahiro Kawasaki, Motohiko Kusakabe

ICRR-Report-579-2010-12  
 “Improved estimation of radiated axions from cosmological axionic strings”  
 Takashi Hiramotsu, Masahiro Kawasaki, Toyokazu Sekiguchi, Masahide Yamaguchi and Jun'ichi Yokoyama

ICRR-Report-580-2010-13  
 “Cosmological constraints on dark matter models with velocity-dependent annihilation cross section”  
 Junji Hisano, Masahiro Kawasaki, Kazunori Kohri, Takeo Moroi, Kazunori Nakayama and Toyokazu Sekiguchi

No.76

2011年3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 佐々木真人 伊藤英男