

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540257 基盤研究（C）

研究課題名（和文） 加速器・宇宙・地下からの素粒子への多角的アプローチ

研究課題名（英文） Multi-faceted approach on elementary particles from accelerators, space, and underground

研究代表者

村山 斉 (HITOSHI MURAYAMA)

東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任教授

研究者番号：20222341

研究成果の概要（和文）：LHCなどの加速器を使った素粒子実験で粒子の性質（スピン）を決めるため、模型についての理論的な仮定によらない手法を開発、すでにある Tevatron や LEP-II のデータでも使えるはずであることを示した。地下ではカムランド実験でニュートリノのパラメータを精密に決め、唯一測られていない混合角である  $\theta_{13}$  が存在する間接的な徴候を得た。宇宙観測では天球の1/3を超える過去最大（一兆画素以上）のイメージを公表した。そしてその三つに共通の課題である暗黒物質が銀河内で消滅する確率が高くなるメカニズムを発見、その証拠を地下ニュートリノ実験で捕える可能性を指摘した。

研究成果の概要（英文）：We developed a novel analysis technique to determine the spin of particles at accelerator experiments such as LHC which is free from theoretical assumptions about the underlying models. This technique should be applicable to existing data from Tevatron and LEP-II. We determined the neutrino parameters more precisely with the KamLAND experiment, and showed indirect hints for  $\theta_{13}$ , the only mixing angle yet to be measured. With observation of space, we released the largest image of the Universe ever, which covers more than a third of the celestial sphere with more than a trillion pixels. In addressing the common problem in these three, we discovered a new mechanism that enhances the annihilation probability of dark matter particles in our galaxy, and pointed out the possibility to find its evidence in underground neutrino detectors.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2009年度 | 900,000   | 270,000 | 1,170,000 |
| 2010年度 | 900,000   | 270,000 | 1,170,000 |
|        |           |         |           |
|        |           |         |           |
| 総計     | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子物理、加速器実験、観測論的宇宙論、ニュートリノ、暗黒物質

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学は岐路にある。標準模型は凄

まじい成功を続け、説明できない実験データはほとんどない。そしてその根本であるヒグ

ス機構は 2010 に始まった LHC 実験で検証されると期待されている。一方で近年標準模型の不完全さも露呈されて来た。日本で初めてニュートリノの質量が発見され、同年アメリカで宇宙の暗黒エネルギーの発見、また 2003 年の WMAP 衛星実験で宇宙の暗黒物質は今まで知られていた物質ではない新しい未知のものであることがはっきりした。更にインフレーション理論が WMAP、SDSS 等のデータでかなり確実視されるようになり、インフレーションの機構や、インフレーション終了後の宇宙バリオン非対称性の起源が問題であることがはっきりした。つまり、LHC でのヒッグス粒子の発見だけでは解決できない問題があることが実験的にはっきりしたことになる。特に、素粒子物理と宇宙論をまたがる実験・理論が重要になった。

標準模型を超える物理を LHC で見つける期待はこうした最近の展開以前からも長らく議論されて来た。それは理論的に標準模型が非常に「醜い」模型であり、特にそのエネルギースケールが不自然に小さいこと（階層性）が問題視されて来た。今までの新しい物理の可能性は主にこの問題を解決するために議論されて来た。近年のデータと組み合わせると、特に暗黒物質が LHC のエネルギー領域にある可能性が濃厚である。これは LHC 実験の新しい目標として掲げることができる。こうして、LHC と宇宙論を絡めた観点がこれから必要になり、素粒子物理学を狭い意味で考えるのではなく、初期宇宙から観測的宇宙論まで含めたもっと広い視点で今後の展開を考えることを目指した。

## 2. 研究の目的

この研究では二つの大きな柱を掲げた。一つは、標準模型を超える素粒子物理の宇宙論・加速器物理・地下実験への帰結を調べ、この期間で出てくる LHC、Planck、XMASS、Fermi などのデータを解析する素地を事前に作り、データが出次第すぐさまその解釈に取りかかれるようにする。もう一つは、超弦理論の研究者とともに TeV スケールで起こる物理のもっともらしい可能性を系統的に調べ、その実験的帰結を導く。当然この二つの柱が結びつくことで実験的な超弦理論の検証可能性へと研究が進むことを狙う。

こうした素粒子物理学が現在置かれている非常に楽しい状況と今までの研究のスタイルを鑑み、この研究計画では LHC、Planck、XMASS、Fermi を中心に今後のデータを予想しつつ標準模型を越える物理の帰結を系統的に調べていく。特に、実際にデータが出て来たときにどのようにその情報を使っていくかに焦点を当てる。

## 3. 研究の方法

村山は本研究計画の申請の直前に新粒子のスピンを定める模型に全く依らない方法を提唱した。これのテクニックを Tevatron で試してみることは非常に面白い。新粒子が見つかった際にはこうしたテクニックを駆使し、一つ一つの粒子の性質を調べていくことで理論的な偏見にとらわれずデータに基づいて新しい理論を構築していくことが必要であり、この具体例はそうした方法の一つになっていくと期待している。

また、missing energy event が見つかった場合、それが暗黒物質の問題に関係しているかどうか非常に面白い問題になる。この場合は加速器実験だけでなく、XMASS のような地下実験、FERMI のような衛星実験、また Icecube などの新しい手法からも多角的に情報を求め、問題にアプローチすることが必要である。例えば、最近の高解像度の N 体シミュレーションでは、銀河や銀河団内の暗黒物質の分布にはかなりの細かい構造が有ることがはっきりして来た。これをふまえて FERMI でのガンマ線のデータと Icecube でのニュートリノのデータが同じ点源を見ることができれば場合、暗黒物質の性質について何が言えるかを調べる。

一方、超弦理論や統一理論からの示唆を知ることも重要である。実験的には TeV 以上の物理に直接アクセスする手だてでは基本的に無いので、高いエネルギースケールでの物理に着いては必然的に理論的なアイデアからの示唆とデータとの比較でその間のエネルギースケールを埋めていくことになる。例えば、ニュートリノの質量のシーソー模型は統一理論と TeV の間のエネルギースケールを使ってニュートリノの質量が有限だが非常に小さい理由を説明しようとする。エネルギースケールが  $10^{14}$  GeV と非常に高いため、実験で直接証明することはできない。しかしながら、学生の Buckley との共同研究で示したことでは、LHC やリニアークライダーで超対称性が見つかり、そのスペクトルが統一理論に合致していると、高エネルギーと低エネルギーでの境界条件を抑えたことになり、その間の物理に制限が付けられる。こうしてジーソー模型、ひいてはニュートリノによるバリオン非対称性の生成の状況証拠をえることができる。こうして理論的な考察と実験データの組み合わせで非常に高いエネルギースケールの物理を制限していく可能性を更に追求していく。

## 4. 研究成果

平成 20 年度は LHC などの衝突型加速器（コライダー）での実験で期待されているように新しい粒子が見つかった場合、どのようにその粒子の性質を特定していくかを

追求した。特にスピンの測定はそのために極めて重要だが、非常に難しいことが知られている。私は学生たちとともにスピンの測定の新手法を提案した。我々の提案の一番大事な点は、模型の詳細を仮定せず、量子力学の原理だけに乗っ取った手法であることで、理論的なバイアスを受けない手法である。まずは簡単な場合として電子・陽電子のコライダーでの場合を調べ、この手法が有望であることを示した。一方 LHC への応用を狙って現在走っているハドロン・コライダーであるテバトロンでは既に Z ボソンが大量に作られており、このデータサンプルにこの手法を適用すれば、スピンの 1 であることが正しく再現できるはずであることを示した。この研究はテバトロン実験に実際に取り組んでいるバークレイの Beate Heinemann との共同であり、彼女は更に実際のデータへの応用に現在取り組んでいる。この新手法の実験的確立も間近だと考える。

一方、ニュートリノの質量の起源を明らかにするために、どのように加速器、地下実験、そして宇宙観測が絡み合って結果を出していけるかを議論した。ニュートリノの質量の起源は大統一理論のスケールに近いが若干低いと考えられており、その「低さ」を利用して加速器実験のデータから模型を制限できる。更に地下実験でのニュートリノのない二重ベータ崩壊の探索、低エネルギーの加速器を使ったレプトン・フレーバーを破る現象の探索、宇宙マイクロ波放射の B モードの偏極、などが全て絡み合い、提案の「加速器・宇宙・地下からの素粒子への多角的アプローチ」通りの例になっている。

提案した素粒子へのアプローチで平成 21 年度は特に宇宙からのものに活発に取り組んだ。PAMELA や FERMI 衛星のデータで宇宙線に（陽）電子の成分が期待されていたものよりも多いことがわかり、銀河のハローの中にある暗黒物質の消滅か崩壊による寄与かもしれないからである。消滅によると思った場合には、現在の宇宙の暗黒物質の量を説明できる充分小さい消滅断面積では宇宙線の量を説明できない。そこで銀河ハローの中での消滅断面積を三桁程大きくするメカニズムが必要であることが知られていた。我々は消滅に寄与する s-channel の仮想粒子がしきい値のわずか下にあると宇宙初期と現在の速度分布の違いのため位相空間で平均した消滅断面積が何桁も大きくなるという非常に簡単なメカニズムを提唱し、Breit-Wigner enhancement と名付けた。Spire データベースによると短期間に 101 件の引用件数がある。また、データで示唆される数 TeV という重い暗黒物質と、

階層性問題で要求される TeV 以下の超対称性ととのずれの問題があった。そこで数十 TeV にある gauge mediation の模型で考えられる超対称性を破るセクターに近似的な対称性があり、その自発的な破れで南部・ゴールドストーン粒子が軽く出るために数 TeV の安定な粒子が存在するという模型を提唱した。これはあと二つのアプローチである加速実験と地下実験両方にとって朗報である。更に宇宙線のデータを説明する模型に一般的に当てはまるニュートリノの信号を指摘し、今後数年間に決定的な検証が可能であることを示した。また、近年原子物理で検証されている位相欠陥の実験にヒントを得て、インフレーション以降の磁気単極子は宇宙論的に排除されていることを指摘し、ニュートリノの質量の起源の模型に制限を与えた。

H22 年度は私の研究が大きく広がり、観測論的宇宙論のデータを初めて出版することができた。素粒子物理学と天体物理学の繋がりはますます緊密になると考えており、特に暗黒物質・暗黒エネルギーの正体の解明は両者に共通の課題である。両方の分野からの研究者が集まった第三期のスローン・デジタル・スカイ・サーベイから最初のイメージングのデータを発表した。これは人類史上最大の宇宙地図であり、一兆画素を超える。現在取り組んでいる分光サーベイのデータと合わせて、バリオン振動という銀河分布の特徴的な相関を基準に遠方銀河への距離を正確に定め、宇宙膨張の歴史を精密測定して、暗黒エネルギーの正体に迫っていく。現在進めているすばる望遠鏡での広視野・大深度のサーベイへの準備にもなる。

一方 LHC 実験が本格的に開始し、新しい物理の発見へ向けての期待が高まっている。既に新粒子崩壊時の方位角の分布に現れる、異なるヘリシティ状態の間の量子干渉の効果が役に立つことは指摘して来たが、今回余剰次元理論に現れるカルツァ・クライン・グラビトンに適用し、スピン 2 という非常に特徴的な情報を引き出せることを示した。(投稿中) 今後 LHC での暗黒物質研究に繋がる。

地下実験についてはカムランド実験に引き続き参加し、特にニュートリノ物理の将来について最も重要なパラメータとなる  $\theta_{13}$  について、ゼロでない可能性を 79% の確度で示した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 21 件)

- ① H. Aihara, C. A. Prieto, D. An, 省略 180 名, 106 番目 “The Eights Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Data From SDSS-III” *Astroph. J. Suppl.* **193**, 29 (2011) 査読有
- ② A. Gando, Y. Gando, K. Ichimura, 省略 62 名, 32 番目 “Constraints on  $\theta_{13}$  from a three-flavor oscillation analysis of reactor antineutrinos at KamLAND” *Phys. Rev.* **D83**, 52002 (2011) 査読有
- ③ S. Jung, H. Murayama, A. Pierce, J. Wells “Top quark forward-backward asymmetry from new  $t$ -channel physics” *Phys. Rev.* **D81**, 015004: 1~5 (2010) 査読有
- ④ M. R. Buckley, K. Freese, D. Hooper, D. Spolyar, H. Murayama “High-Energy Neutrino Signatures of Dark Matter” *Phys. Rev.* **D81**, 016006:1~7 (2010) 査読有
- ⑤ Hitoshi Murayama, Jing Shu, “Topological Dark Matter” *Phys. Lett.* **B686**, 162~165 (2010) 査読有
- ⑥ Masahiro Ibe, Hitoshi Murayama, T. T. Yanagida, “Breit-Wigner Enhancement of Dark Matter Annihilation” *Phys. Rev.* **D79**, 095009-1~5 (2009) 査読有
- ⑦ M. Buckley, H. Murayama, K. William, V. Rentala, “Quantum interference effects among helicities at CERN LEP-II and Fermilab Tevatron” *Phys. Rev.* **D77**, 113017 (7pp) (2008) 査読有
- ⑧ M. Buckley, H. Murayama, K. William, V. Rentala, “Discriminating spin through quantum interference” *Phys. Rev.* **D 78**, 14028 (13pp) (2008) 査読有

〔学会発表〕 (計 41 件)

- ① H. Murayama, “Dark Matter and Dark Energy from Topology” invited talk at Planck2010 “From the Planck Scale to the ElectroWeak Scale”, 2010 年 5 月 25 日, ジュネーヴ、スイス
- ② H. Murayama, “Theory of Beyond the Standard Model physics” invited talk at Physics at LHC 2010, 2010 年 6 月 8

日、ハンブルク、ドイツ

- ③ H. Murayama, “Deciphering New Physics Through Spin Measurement Using Quantum Interference” KITP Conference “Anticipating Physics at the LHC” 6/2/09, University of California at Santa Barbara, “The LHC and Cosmology,” invited talk at New Eyes on the Universe: 400 Years of Telescope, On the Threshold of the LHC, American Physical Society Meeting, 2009 年 5 月 2 日、デンバー・米国

〔図書〕 (計 2 件)

- ① 村山 斉「宇宙は何でできているのか」幻冬舎、226 ページ (2010)
- ② 村山 斉「宇宙に終わりはあるのか」ナノオプトニクス・エナジー出版、152 ページ (2010)

〔その他〕

ホームページ等  
<http://hitoshi.ipmu.jp>

6. 研究組織  
(1) 研究代表者

村山 斉 (Hitoshi Murayama)  
東京大学・数物連携宇宙研究機構  
・特任教授

研究者番号 : 20222341

(2) 研究分担者 ( )

研究者番号 :

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号 :