

平成 30 年 5 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247042

研究課題名(和文) 隠れたセクターの場や粒子が引き起こす多様な宇宙現象を用いた究極理論探査

研究課題名(英文) Quest for the Ultimate Theory in terms of rich cosmophysical phenomena caused by fields and particles in the hidden sector

研究代表者

小玉 英雄 (Kodama, Hideo)

京都大学・基礎物理学研究所・特任教授

研究者番号：40161947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 27,510,000円

研究成果の概要(和文)：超弦理論と呼ばれる統一理論が、自然の最も根源的な基本法則であるかどうかを、理論の予言する非常に弱い相互作用をする場や粒子が引き起こす特有の宇宙現象の観測により検証する方策を組織的に探査した。成果として、アクシオンと呼ばれるスカラー場とブラックホールの相互作用から生じる重力波の観測、高エネルギー天体からのガンマ線と赤外線背景放射の観測、アクシオンダークマターを通過する電磁波や重力波の観測、加速器における新粒子探査、宇宙初期インフレーションのCMBによる観測など様々な検証法を提案した。さらに、素粒子標準模型および宇宙現象の双方を統合的に記述する可能性のある超弦理論の例をいくつか具体的に構成した。

研究成果の概要(英文)：We have systematically explored methods to probe whether the unified theory called string theory is the ultimate theory of Nature in terms of observations of phenomena caused by fields and particle in the hidden sector specific to superstring theory. As a result, we have proposed lots of new methods such as the observation of gravitational waves produced by the interaction between black holes and a scalar field called axion, observations of gamma rays from high-energy astrophysical objects and cosmic infrared background radiations, observations of electromagnetic and gravitational waves passing through axion dark matter, new particle searches by accelerator experiments, CMB observations of inflation in the early universe. Further, we have constructed some concrete examples of superstring compactifications that are consistent with both the standard model of elementary particles and cosmology.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：アクシオン 超弦理論コンパクト化 ブラックホール 重力波 インフレーション

## 1. 研究開始当初の背景

超弦理論・M理論は、物質場やその相互作用が理論の整合性により強く規定されるという注目すべき特徴をもち、様々な統一理論や量子重力理論の中で、すべての相互作用と物質の統一理論と言える唯一の理論族で、自然界の究極理論の最有力候補である。

しかし、これらの理論は、依然として、元々の高次元理論から4次元理論を導くコンパクト化の問題、余剰空間のモジュライ安定化問題、宇宙論的モジュライ問題、インフレーション問題など様々な課題を抱えている。自由パラメータを全く持たない究極理論は、当然、無限個の可能な低エネルギー世界の法則を内包しており、我々がそのすべての可能性を詳細に研究することによりこれらの課題を解決することは不可能である。実験観測により得られる情報を用いて、可能性を絞り込む必要がある。その手段として近年、注目され始めているのが、隠れたセクターの生み出す宇宙現象である。

## 2. 研究の目的

超弦理論コンパクト化による4次元化機構を解明する一つの有力な方法は、高次元理論の4次元化に伴い不可避免的に生み出される隠れたセクターの多様な場や粒子に着目し、それらの引き起こす様々な特有の宇宙現象を理論的に研究し、それを実際の宇宙観測で検証することである。

研究代表者は、この観点から、インフレーションを通して究極理論を探ることを目的とした UTQuest プロジェクトとストリングアクシオンが引き起こす宇宙現象の研究を中心とした Axiverse プロジェクトの2つのプロジェクトをこれまで多機関連合により推進してきたが、本研究ではそれらを統合し、残された未解明現象を宇宙物理学研究者と超弦理論研究者が連携して研究することにより、ポスト Planck、ポスト LHC の時代に向けて、電磁波および重力波観測により究極理論を探る新たな道を切り開くことにある。

## 3. 研究の方法

本研究では、まず、密接に関連した以下の6つのテーマについて平行して研究を進め、その成果に基づいて、最終的に超弦理論コンパクト化の絞り込みという課題に挑戦する：

- (1) ブラックホールが引き起こす諸現象とその重力波観測
- (2) 宇宙の電磁波に対する透明性へのストリングアクシオンの影響の定量評価
- (3) 隠れたセクターの宇宙論
- (4) インフレーション宇宙モデルの構築
- (5) 新たな現象と観測情報の探査
- (6) 素粒子理論、宇宙論双方と整合的な超弦理論コンパクト化の構成

## 4. 研究成果

[ ]の番号は、次項の雑誌論文リストの番号。

- **回転ブラックホールによるアクシオン増幅反射不安定の非線形ダイナミクスとそれに伴う重力波放出**[1][10][11]: 回転ブラックホールまわりで増幅放射不安定によって成長するアクシオン場の振る舞いは、ブラックホールのスピンパラメータ  $a_*$ 、アクシオン質量とブラックホール質量の積で決まる無次元パラメータ  $\alpha_g$  の値、アクシオン崩壊係数と呼ばれるエネルギーの次元をもつパラメータ  $f_a$ 、および方位量子数  $(l, m)$  で分類される初期モードにより決まる。これらのパラメータの様々な値に対して、アクシオン・ブラックホール系の相対論的数値シミュレーションを行い、アクシオン雲の非線形現象の詳細を初めて明らかにした。特に、 $l = m = 1$  のモードに対して、 $\alpha_g \sim 0.3$  では、ボーズノバと呼ばれる比較的激しい現象が起きるのに対して、 $\alpha_g$  の値がより大きい場合や、他のモードに対しては、アクシオン雲の成長が非線形相互作用により止まったあと、よりマイルドな準周期的収縮と膨張を繰り返し、ブラックホールのエネルギーをアクシオン放射や重力波として放出し続けることを見いだした。さらに、アクシオン雲からの重力波放射量を数値的に計算し、将来の衛星重力波観測実験 LISA により銀河中心核ブラックホールからの重力波観測を行えば、超弦理論から期待される  $f_a$  の値に対して、質量  $m_a \sim 10^{-17}$  eV をもつアクシオンが自然界に存在するかどうかを実験的に確認できることを示した。
- **電磁波に対する宇宙の透明性問題のストリングアクシオンによる解決**[26]: 2017年に CIBER 実験は宇宙赤外線背景放射 (CIB) の直接観測のデータを発表した。報告された CIB のフラックスの値は銀河起源の背景放射として推定される値よりかなり多く、高赤方偏移の活動銀河核などの天体から来る TeV ガンマ線はその伝搬途上において必然的に強い吸収を受けることが予想される。しかし、HESS などによる高赤方偏移天体からのガンマ線観測では、そうした強い吸収は報告されていない。この矛盾を解消する最も有力な方法として、磁場中でのアクシオンと光子の混合を用いるアプローチが知られている。この方法では、TeV ガンマ線がそのソース近辺の磁場によりアクシオンに変換されると、途中の銀河間空間では CIB による吸収を受けないことを利用する。我々の銀河に入ったアクシオンは銀河間磁場の下で再びガンマ線に変換され、観測されることになる。我々は、いくつかの TeV ガンマ線天体のスペクトルの観測値と CIBER のデータに基づいて、この方法で矛盾を解消することが可能であることを示し、アクシオンの理論パラメータである光子との結合定数および質量の許容範囲を具体的に決定した。
- **銀河中心方向での GeV ガンマ線超過の起源**

[5]: 銀河中心方向からの GeV ガンマ線放射に、通常の拡散成分に加えて超過があることを Fermi 衛星が発見し、その起源がダークマターの対消滅かミリ秒パルサーの新しい種族なのかで論争になっている。我々は、ミリ秒パルサーの場合、GeV ガンマ線よりも多くのエネルギーがパルサー風として放出されていることに注目し、パルサー風によって逆コンプトン散乱を受けた TeV ガンマ線の観測によってモデルを区別できることを初めて提案した。

- **アクシオンダークマターの電磁波および重力波による検出**[16][23][36]:  $f(R)$ 重力理論には、小さな質量  $M$  をもつスカラ場が実効的に含まれる。アクシオンがダークマターの成分で、その質量が  $M$  と近い値をもつと、重力場との共鳴的相互作用により、アクシオン場および重力場の振幅が大きく増幅され、パルサータイミングで観測可能となり得ることを明らかにした。また、この振動が重力波干渉計によって観測可能であることも示した。特に、ダークエネルギーが修正重力理論で説明されるような場合には共鳴によってシグナルが増大し、観測可能性が増すことを示した。さらに、アクシオン暗黒物質が存在するならば、その中を重力波や電磁波が伝播するとき、チャーン・サイモン項を通したパラメータ共鳴が生じる可能性があることも明らかにした。
- **複数のアクシオン間の混合が生み出す諸現象**[4][14]: 強い相互作用における CP 問題の解として有力な Peccei-Quinn 機構において、自発的対称性の破れを引き起こすセクターの拡張を提唱し、複数のアクシオンが存在することによる宇宙論および現象論への影響を調べた。具体的には、QCD アクシオンと別種のアクシオン型粒子との間に質量混合がある場合には、エネルギー準位交差による共鳴現象が起き、これによってダークマター存在量および等曲率揺らぎが大きく変化することを示した。また、複数のアクシオン場の質量混合が特定のパターンをもつ場合は、「クロックワーク機構」が働き、QCD アクシオンの崩壊定数と対称性の破れのスケールに大きな階層性が生じることを示した。さらに、この機構により、核子と強く結合した重く不安定なスカラ粒子が複数現れるので、LHC 加速器実験で重い複数の粒子を見つけるとによりこのシナリオを検証できることを指摘した。また、重い複数の粒子のおかげで、ニュートリノのシーソー機構と同様、軽く安定なアクシオン暗黒物質が存在すること、Peccei-Quinn 対称性が高い精度で保たれることの説明が可能であること、および自発的対称性の破れに伴って生じるストリングおよびドメインウォールが非自明な空間的配位を持ち、その崩壊に伴い大量の重力波

を生成しうることを明らかにした。

- **フラクシオン模型の提案**[22]: 素粒子標準模型におけるフレーバー階層性問題と強い CP 問題を同時に解決する、新たなアクシオン模型 (フラクシオン模型) を提案した。この模型には、 $K$  中間子等の稀崩壊が通常のアクシオン模型に比べて非常に大きくなるという特徴があり、将来の加速器実験での探索可能性を議論した。また、暗黒物質やバリオン非対称性、さらにインフレーションも模型の枠内で説明可能であることを示した。
- **ハイスケールヒッグスインフレーションモデル**[20][24]: LHC でのヒッグス粒子の発見により、我々の宇宙は準安定真空状態にあることが明らかになった。これに伴い、初期宇宙での真空の不安定性を真剣に議論する必要が出てきた。インフレーション終了後の再加熱の時期における電弱真空の不安定性の存在を指摘し、現在まで我々の宇宙が存続するためにはインフレーションの模型に対して強い制限が付けられることを示した。
- **極大超重重力理論における中間スケールインフレーションモデルの構築**[9]: 4 次元における極大超重重力理論は、 $SO(4,4)$  をゲージ群とするゲージ化が可能で、変形パラメータと呼ばれる 1 個のパラメータをもつ理論が得られる。この理論では、スカラ場のポテンシャルがドジッター時空を表す極点を 2 種類持つが、このうち、Dall'Agata と Inverso により発見された  $SO(3) \times SO(3)$  対称性をもつ極点におけるポテンシャルの曲率は、変形パラメータがある臨界値に近づく、ゼロに近づく。パラメータがこの臨界値に非常に近いとき、この理論では、現在の CMB 観測と整合的な中間スケールインフレーションモデルが自然に実現されることを示した。
- **超弦理論コンパクト化に基づくアクシオンインフレーションモデル**[28]:  $D$  ブレーンを含む IIB 型超弦理論のコンパクト化は、4 次元低エネルギー理論として素粒子標準モデルを再現する可能性のある枠組みである。この枠組みでのオービフォルドコンパクト化により、 $B$  場と呼ばれる 2 形式場のゲージ対称性が、離散的な対称性に破れ、それに伴って、小スケールインフレーションを実現する平坦な周期ポテンシャルをもつアクシオン場が生み出されることを示した。また、このインフレーションモデルが観測と整合的であるためには、余剰次元のサイズが弦理論スケールに近いことが必要であることを示した。
- **現実的な超弦理論コンパクト化の探査**[2][6][12][17][25]: 超弦理論コンパクト化において、コンパクト余剰空間のサイズや構造のモジュライ自由度は、4 次元理論において力学的な場を生み出す。これらモジュライ場は、高エネルギーでは宇宙のイ

ンフレーションなどを引き起こし、低エネルギーでは安定した真空期待値を持ち、素粒子標準模型の基本定数の値を決定する。このため、モジュライ場の動力学やその値の安定化機構の理解は、現実的な超弦理論コンパクト化の探索において決定的な重要性をもつ。しかし、これまで、コンパクト化による素粒子標準模型の導出の研究とこれらのモジュライ安定化の研究は独立に行われてきた。我々は、標準模型のゲージ群やGUT型のゲージ群の下で3世代のクォーク・レプトンが現れるコンパクト空間において、D-ブレーンインスタントン効果を具体的に計算し、この非摂動的効果によりモジュライが固定されることを示した。また、摂動的効果を改めて吟味し、超対称粒子の質量による効果で、モジュライのポテンシャルが生成され、真空期待値が決定されることが可能であることを示した。

#### 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] (査読有り 計 143 件)

主要な論文のみを掲載。

- (1) "Gravitational radiation from an axion cloud around a black hole: Superradiant phase"  
Hirotaka Yoshino and Hideo Kodama  
PTEP 2014, 043E02 (2014)
- (2) "F-theory Family Unification"  
Shun'ya Mizoguchi  
JHEP 1407, 018:1-39 (2014)
- (3) "Axion Models with High Scale Inflation"  
T. Moroi, K. Mukaida, K. Nakayama and M. Takimoto,  
JHEP 1411, 151 (2014)
- (4) "Resonant conversions of QCD axions into hidden axions and suppressed isocurvature perturbations"  
Naoya Kitajima, Fuminobu Takahashi  
JCAP 1501, 32 (2015)
- (5) "Testing the millisecond pulsar scenario of the Galactic center gamma-ray excess with very high energy gamma-rays"  
Qiang Yuan, Kunihito Ioka  
The Astrophysical Journal, 802, 124 [6p] (2015)
- (6) "Natural inflation with and without modulations in type IIB string theory"  
H. Abe, T. Kobayashi and H. Otsuka  
JHEP 1504, 160:0-19 (2015)
- (7) "Gravitational Effects on Inflaton Decay"  
Y. Ema, R. Jinno, K. Mukaida and K. Nakayama,  
JCAP 1505, 038 (2015)
- (8) "Small Field Coleman-Weinberg Inflation driven by Fermion Condensate"  
Satoshi Iso, Kazunori Kohri, and Kengo Shimada  
Physical Review D 91, 44006 (2015)
- (9) "Inflation in maximal gauged supergravities"  
Hideo Kodama and Masato Nozawa  
JCAP 1505, 028 (2015)
- (10) "Bosenova and Axiverse"  
H. Yoshino and H. Kodama  
Class. Quantum Grav. 32, 214001 (Invited contribution to the Focus Issue on "Black holes and fundamental fields")
- (11) "Probing the string axiverse by gravitational waves from Cygnus X-1"  
H. Yoshino and H. Kodama,  
Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 061E01 (2015)
- (12) "Realistic three-generation models from SO(32) heterotic string theory"  
H. Abe, T. Kobayashi, H. Otsuka and Y. Takano  
JHEP 1509, 056:0-28 (2015)
- (13) "Can we explain AMS-02 antiproton and positron excesses simultaneously by nearby supernovae without pulsars nor dark matter?"  
Kazunori Kohri, Kunihito Ioka, Yutaka Fujita, Ryo Yamazaki  
PTEP 2015, 021E01 [8p] (2016)
- (14) "The QCD Axion from Aligned Axions and Diphoton Excess"  
Tetsutaro Higaki, Kwang Sik Jeong, Naoya Kitajima, Fuminobu Takahashi  
Physics Letter B 755, no.4, 13-16 (2016)
- (15) "Quality of the Peccei-Quinn symmetry in the Aligned QCD Axion and Cosmological Implications"  
Tetsutaro Higaki, Kwang Sik Jeong, Naoya Kitajima, Fuminobu Takahashi  
JHEP 1606, 150:0-23 (2016)
- (16) "Detecting ultralight axion dark matter wind with laser interferometers"  
A. Aoki and J. Soda,  
Int. J. Mod. Phys. D 26, no. 07, 1750063 (2016).
- (17) "New potentials for string axion inflation"  
T. Kobayashi, A. Oikawa and H. Otsuka  
Phys. Rev. D 93, 083508:1-11 (2016)
- (18) "Cosmic-Ray Hardenings in the Light of AMS-02"  
Yutaka Ohira, Norita Kawanaka, Kunihito Ioka  
Physical Review D, 93, 083001 [7p] (2016)

- (19) "Topological Defects and nano-Hz Gravitational Waves in Aligned Axion Models"  
Tetsutaro Higaki, Kwang Sik Jeong, Naoya Kitajima, Toyokoza, Sekiguchi, and Fuminobu Takahashi  
JHEP 1608, 044:0-29 (2016)
- (20) "Fate of Electroweak Vacuum during Preheating"  
Y.Ema, K.Mukaida and K.Nakayama,  
JCAP 1610, 043 (2016)
- (21) "Nonthermal Gravitino Production after Large Field Inflation"  
Y. Ema, K. Mukaida, K. Nakayama and T. Terada,  
JHEP 1611, 184 (2016)  
Physics Letters B 768, 30 – 37 (2017)
- (22) "Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model"  
Y. Ema, K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Nakayama,  
JHEP 1701, 096 (2017)
- (23) "Nonlinear resonant oscillation of gravitational potential induced by ultralight axion in f(R) gravity"  
A. Aoki and J. Soda,  
Phys. Rev. D 96, 023534 (2017).
- (24) "Violent Preheating in Inflation with Nonminimal Coupling,"  
Y. Ema, R. Jinno, K. Mukaida and K. Nakayama,  
JCAP 1702, 045 (2017)
- (25) "Supersymmetry preserving and breaking degenerate vacua, and radiative moduli stabilization"  
T.Kobayashi, N.Omoto, H.Otsuka and T.H.Tatsuishi  
Phys. Rev. D 96, 046004:1-10 (2017)
- (26) "Axion-Like Particles and Recent Observations of the Cosmic Infrared Background Radiation"  
Kazunori Kohri and Hideo Kodama  
Physical Review D 96, 051701:1-6 (2017)
- (27) "The ALP miracle: unified inflaton and dark matter"  
Daido Ryuji, Takahashi Fuminobu, Yin Wen  
JCAP 1705, 44 (2017)
- (28) "Inflation from periodic extra dimensions"  
Tetsutaro Higaki, Yoshiyuki Tatsuta  
JCAP 1707, 011:0-18 (2017)
- (29) "Constraints on long-lived electrically charged massive particles from anomalous strong lens systems"  
Kamada Ayuki, Inoue Kaiki Taro, Kohri Kazunori, Takahashi Tomo  
JCAP 1711, 008 (2017)
- (30) "Explosive Axion Production from Saxion,"  
Y. Ema and K. Nakayama,  
Phys. Lett. B 776, 174 (2018)
- (31) "Adiabatic suppression of the axion abundance and isocurvature due to coupling to hidden monopoles"  
Masahiro Kawasaki, Fuminobu Takahashi, Masaki Yamada  
JHEP 1801, 53 (2018)
- (32) "High-energy Neutrinos from Multi-body Decaying Dark Matter"  
Nagisa Hiroshima, Ryuichiro Kitano, Kazunori Kohri, Kohta Murase  
Physical Review D 97, 23006 (2018)
- (33) "The ALP miracle revisited"  
Ryuji Daido, Fuminobu Takahashi, Wen Yin  
JHEP 1802, 104 (2018)
- (34) "Revisiting Big-Bang Nucleosynthesis Constraints on Long-Lived Decaying Particles"  
Masahiro Kawasaki, Kazunori Kohri, Takeo Moroi, Yoshitaro Takaesu  
Physical Review D 97, 23502 (2018)
- (35) "Enhanced axion-photon coupling in GUT with hidden photon"  
Daido Ryuji, Takahashi Fuminobu, Yokozaki Norimi  
Physics Letters B 780, 538-542 (2018)
- (36) "Electromagnetic waves propagating in the string axiverse"  
D. Yoshida and J. Soda,  
PTEP 2018, 041E01 (2018).
- [学会発表](計 162 件, 内招待講演 94 件)  
主要な招待講演のみを掲載。
- (1) Hideo Kodama  
"Exploring the Axiverse by Gravitational Waves and Gamma Rays"  
IAS workshop "New Perspective on Cosmology" (Hong Kong U.) 2014/5/20
- (2) T. Kobayashi  
"Heterotic asymmetric orifolds"  
Bethe Forum "non-geometry, asymmetric orbifolds and model building" (ボン、ドイツ) 2014/6/10-13
- (3) Fuminobu Takahashi  
"Searching high and low for traces of inflation" String Pheno 2014, 2014 年
- (4) Kunihito Ioka  
"Unveiling the Origin of High-Energy Neutrinos" Korean Physics Society Meeting(Gwangju, Korea)2014/10/22-24
- (5) Hideo Kodama  
"Probing the non-linear dynamics of the black hole-axion system by gravitational waves" Strong Gravity Workshop (Lisbon ITS) 2015/6/10-12
- (6) H. Yoshino and H. Kodama  
"Axion Bosenova and Gravitational

- Waves” Hot Topics in General Relativity and Gravitation (HTGRG-2) (ICISE, クイニオン, ベトナム) 2015/8/9-15
- (7) 郡 和範  
“Reinterpretation of the Starobinsky-type inflation models”  
LeCosPA 2015 (Taiwan) 2015 年
- (8) Fuminobu Takahashi  
“Axion and Higgs Domain Walls”  
String Pheno 2015, 2015 年
- (9) T. Kobayashi  
“Novel potentials for string axion inflation” IBS-PNU Joint Workshop on Particle Physics, String Theory and Cosmology (釜山,大韓民国)2015/12/2-5
- (10) Kazunori Nakayama  
“Gravitational Particle Production after Inflation with Extended Gravity Models” Everything about Gravity, LeCosPA (Taiwan) 2015/12/15
- (11) Tetsutaro Higaki  
“Inflation through hidden Yukawa couplings in the extra dimension”  
“IBS-PNU Joint Workshop on Particle Physics, String Theory, and Cosmology” (釜山広域市, 大韓民国) 2015/12
- (12) Kunihito Ioka  
“Bright Side of the AMS-02 Results”  
Dark Side of the Universe (YITP, Japan) 2015/12/14-18
- (13) Fuminobu Takahashi  
“Axions” Invisibles 16, 2016
- (14) Kunihito Ioka  
“Black Hole Systems as Multi-Messenger Sources” IAU symposium 324: New Frontiers in Black Hole Astrophysics (Slovenia) 2016/9/12-16
- (15) 郡 和範  
“Recent IR background observations and axion-photon conversions” UTQuest5 workshop Hidden Sector Physics and Cosmophysics (京都) 2016
- (16) 檜垣 徹太郎  
“Inflation from periodic extra dimensions” Topological Science Workshop 2017 (横浜) 2017/2
- (17) Jiro Soda  
“Exploring string axiverse with gravitational wave physics”  
IV Cosmology and the Quantum Vacuum 2017 (Spain) 2017/9/7
- (18) Fuminobu Takahashi  
“The ALP miracle” 7th General IAXO Collaboration Meeting, 2017
- (19) Shun'ya Mizoguchi  
“Realizing E6 GUT in F-theory” KMI workshop "GUTs" (名古屋市) 2017/12/19
- (20) Kazunori Nakayama  
“Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model”

Focus Meeting: new perspectives on light particles, Institute for Basic Science (Korea) 2017/11/28

6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
小玉 英雄 (KODAMA, Hideo)  
京都大学・基礎物理学研究所・特任教授  
研究者番号: 40161947
- (2) 研究分担者
- ・ 井岡 邦仁 (IOKA, Kuninito)  
京都大学・基礎物理学研究所・教授  
研究者番号: 80402759  
(平成 27 年 3 月 31 日まで連携研究者)
  - ・ 郡 和範 (KOHRI, Kazunori)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授  
研究者番号: 50565819
  - ・ 高橋 史宜 (TAKAHASHI, Fuminobu)  
東北大学・理学研究科・准教授  
研究者番号: 60503878
  - ・ 檜垣 徹太郎 (HIGAKI, Tetsutaro)  
慶應義塾大学・理工学部・専任講師  
研究者番号: 10629059  
(平成 27 年 3 月 31 日まで連携研究者)
  - ・ 中山 和則 (NAKAYAMA, Kazunori)  
東京大学・理学系研究科・助教  
研究者番号: 90596652
  - ・ 吉野 裕高 (YOSHINO, Hiroataka)  
大阪市立大学・理学研究科・特任助教  
研究者番号: 20377972  
(平成 28 年 3 月 31 日まで連携研究者)
- (3) 連携研究者
- ・ 小林 達夫 (KOBAYASHI, Tatsuo)  
北海道大学・理学研究科・教授  
研究者番号: 60322153
  - ・ 早田 次郎 (SODA, Jiro)  
神戸大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 00222076
  - ・ 溝口 俊弥 (MIZOGUCHI, Shun'ya)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師  
研究者番号: 00222323
  - ・ 住友 洋介 (SUMITOMO, Yoske)  
平成 26 年 4 月～平成 28 年 3 月  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・非常勤研究員 (現, 日本大学・理工学部・助手)  
研究者番号: 70729243
- (4) 研究協力者  
野澤 真人 (NOZAWA, Masato)  
平成 26 年 4 月～平成 27 年 3 月  
ミラノ大学・物理学教室・博士研究員 (現, 京都大学・理学研究科・特定研究員)  
研究者番号: 60547321