

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05409

研究課題名（和文）有効演算子の分類と暗黒物質

研究課題名（英文）Classification of Effective Operators and Dark Matter

研究代表者

村山 斉（MURAYAMA, HITOSHI）

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授

研究者番号：20222341

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：素粒子の標準模型は、ヒッグス粒子発見で完成したが、階層性の問題、暗黒物質、物質・反物質の非対称性など標準模型を超える物理の存在がある。その効果を調べるため、有効場の理論が有用な手法であり、有効演算子の分類が必須と考えた。本提案では、一般の場の理論に対して有効演算子を分類する方法を確立できた。また、宇宙初期の物質の起源のしくみに必要な物質・反物質非対称性に係る理論の観測的検証可能性を進展させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究は、任意の次元・任意の対称性を持つ場の理論について、有効演算子の分類を行うもので、非常に一般的であり、その成果は一般的な量子場の理論の教科書に載るべきものになると考える。ここでは喫緊の課題として暗黒物質の有効場理論への応用を考えたが、さらに非相対論的な物性系、宇宙の密度ゆらぎの有効場理論、原子核や原子物理への応用など、さまざまな発展が考えられる。

研究成果の概要（英文）：Standard Model of particle physics was established by the discovery of the Higgs boson, yet there must be physics beyond the Standard Model to explain the hierarchy problem, dark matter, and the asymmetry between matter and anti-matter. Effective field theories are useful approach to these problems, and I proposed to study classification of effective operators. In this research program, I established classification of effective operators in any quantum field theories. In addition, I pointed out observational tests of theories that explain matter-anti-matter asymmetry from the early universe necessary to understand the origin of matter.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子 原子核 宇宙線 宇宙物理

1. 研究開始当初の背景

有効場の理論は、ノーベル賞を与えられた南部・ジョナラシニオ理論に始まり、高いエネルギーにある未知の物理の効果をパラメータ化し、その影響を調べるために有用であることは長いこと知られている。一般に、くりこみ可能な場の理論のラグランジアンに対して、くりこみ不可能なirrelevantな(質量次元が高い)有効演算子を加えることで扱う。そのため、与えられたfield contentと対称性のもとで、許される有効演算子を分類することが最初のタスクとなる。

しかし、標準模型について質量次元の低次である $D=5,6$ の場合ですら、その分類には四半世紀かかった。技術的な困難があったためである。

最初の重要な仕事はWeinbergが1980年に、バリオン数やレプトン数を破る $D=5,6$ の有効演算子を分類したことであった。その後BuchmüllerとWylerが1986年にバリオン数、レプトン数を保存する $D=5,6$ の有効演算子の分類を試み、一世代の場合(フレーバーを破らない場合)について80個の有効演算子を書き下した。しかし、その後有効演算子の間にredundancyがあることがわかり、一方新しい有効演算子も見つかるなど、長いことnon-redundantでcompleteなリストがわかっていなかった。やっと2010年になって、Grzadkowskiたちがそうした有効演算子のリストを見つけることに成功した。そして現実的な三世代の場合で、フレーバーを破る有効演算子も含めたリストは、2013年にManoharたちによって見つけられた。

ここでの技術的な困難はredundancyの取り扱いである。一つは運動方程式で等価になる演算子で、それらは全ての S -行列で同じ答えを与えるため、独立に数えてはならない。一方全微分で書ける演算子は S -行列に全く寄与しないため、そもそも数えてはならない。このredundancyをローレンツ不変性、ゲージ不変性を保ちつつ、きちんと落として行く系統的な方法がなく、一つ一つの演算子を手作業で調べていたため、これほど長くかかったのである。

村山はBrian Henning, Xiaochuan Lu, Tom Meliaとともに、標準模型の有効演算子を系統的にlist upする手法を提案した。ポイントは、標準模型のkinetic termだけを0次の理論と考えると、古典的には共形不変性があることである。そして共形場の理論では、operator-state correspondenceという重要な性質があり、これにより演算子の分類を表現論で行うことができる。そのため、標準模型に加える有効演算子は共形代数 $SO(4,2)$ の表現論が役に立つ。その際、unitarity boundをsaturateする場(つまり0次ラグランジアンの自由場)について、short multipletと呼ばれる表現が運動方程式を満たすため、short multipletを使うとこのredundancyが自動的に取り除ける。一方全微分で書ける演算子は、共形場の理論ではdescendantに対応し、それを取り除くにはprimary fieldのみを探せば良い。自由場の分配関数はshort multipletに対する共形代数の表現のcharacterのplethystic exponentialになる。それとゲージ群のcharacterの積で一つ一つの場を表し、その積をHaar測度で積分してやれば、primary fieldのみをカウントすることができる。こうして $D=5,6$ の有効演算子の分類は数秒で可能になり、さらに $D=15$ までのリストを書き出すことに成功した。そこでこれから必要になるのは、標準模型に限らず一般の場の理論への拡張となった。

2. 研究の目的

素粒子の標準模型は、2012年のヒッグス粒子の発見で完成した。しかし階層性の問題、暗黒物質、物質・反物質の非対称性など、標準模型を超える物理があることは間違いない。その効果を調べるにあたり、有効場の理論が有用な手法である。その際有効演算子を分類することが必須となる。本提案では、一般の場の理論に対して有効演算子を分類する方法を確立すること

をめざした。すでに標準理論については、共形代数の表現論を用いてその方法を確立していたが、これを一般の次元と対称性、非線形シグマ模型、暗黒物質の有効場理論などに拡張、応用し、同時に最近提案した強い相互作用をする暗黒物質の模型について、有効場理論の手法と組み合わせることで、現象論を展開して実験的検証可能性を調べた。

3. 研究の方法

時空の次元を一般化する。またゲージ対称性以外に、大局的対称性、またパリティなどの時空離散対称性の取り扱い方を調べる。後者は共形代数と必ずしも交換しないため、慎重な検討が必要となる。一方くりこみ可能性でない場の理論も重要である。その代表格として非線形シグマ模型がある。2次元以外の時空では崩壊定数が必然的に質量次元を持つため、共形場の理論が使えないと考えられる。一方 Maurer-Cartan formを基本的な場と考えると、運動方程式は co-exactness に対応し、外微分は formの積で書き換えられるため独立に数える必要がない。そのため、Hodge代数の手法が役に立つと期待できる。

さらに暗黒物質の有効場理論への応用を考える。今までは超対称性理論のニュートラリーノに触発され、暗黒物質を素粒子と考え、その場について、主にマヨラナ・フェルミオンの場合が考察されてきた。スカラー場、ベクトル場についても我々の手法では調べられるはずである。また、村山が Yonit Hochberg, Eric Kuflikと提案している強い相互作用をする重い粒子SIMPの場合は、非線形シグマ模型で記述されるため、上で述べた拡張が必要になる。これが可能になれば、現象論を展開するのが容易になるので、実験的検証可能性について定量的に研究する。

特にSIMPについては、角を持つ場合にはWess-Zumino項がなくても3次元の消滅過程が可能になるため、新しい現象論が考えられる。また、大局的対称性をゲージ化することにより、強い相互作用のスケールとSIMPの質量が近い偶然を、説明する可能性もある。この場合、ベクトル場の非線形シグマ模型が有効理論となるため、上で述べた拡張がさらに重要となる。こうしたSIMP理論のバリエーションについても、ここで研究する手法を応用し、調べて行く。

4. 研究成果

Brian Henning, Xiaochuan Lu, Tom Meliaとともに提案した、標準模型の有効演算子を系統的にlist upする手法は分野では非常に注目されており、関連分野のINSPIREのデータベースでは117件の引用がある。これをさらに発展させ、提案した通りの研究が完成し、出版した。これも早くも54件の引用があり、広く活用されている。この論文では時空の次元を一般化した。またゲージ対称性以外に、大局的対称性、またパリティなどの時空離散対称性の取り扱い方を明らかにした。非線形シグマ模型について Maurer-Cartan formを基本的な場と考えて、Hodge代数の手法を使って定式化が完了した。

また、有効演算子を実際に計算する際は、今までのファインマングラフによる通常の方法では途中でゲージ不変性を保つことができないため、有効演算子の線型結合を言縄薄必要があり、煩わしいだけでなく結果の信頼性が疑わしいことがあった。Brian Henning, Xiaochuan Luとともにゲージ不変性を常に保つ「共変微分展開」という手法を提案し、特に軽い粒子と重い粒子が両方ある場合の寄与のmatchingの問題を解決した。この論文もすでに52件の引用がある。このように本研究計画のテーマである有効演算子の理論について

いずれは教科書に載るレベルの結果を出すことができた。

この結果を早速応用し、暗黒物質の問題に取り組んだ。Soo-Min Choi, Yonit Hochberg, Eric Kuflik, Hyun Min Lee, Yann Mambriniとともに、有効演算子の結果を活用して、SIMPのパラダイムをスピン1の粒子に拡張することに成功した。さらにSIMPを階層性問題を解消するtwin Higgs模型と融合することにも成功し、Web of Scienceでは物理学分野でトップ1%論文になっている。またYonit Hochberg, Eric Kuflik, Robert McGehee, Katelin Schutzとともにアキシオンが媒介する模型も発表した。

またSIMPのように大きさを持つ暗黒物質の模型では、自己相互作用が大きいことが期待され、銀河内での質量分布にまつわる謎を説く可能性がある。その際、最近のデータでは矮小楕円銀河と銀河団の間での暗黒物質の分布の違いを説明するために、自己相互作用の断面積が強い速度依存性を持つ必要が指摘されるようになった。そこでCamilo Garcia-Cely, Xiaoyong Chuとともに、共鳴散乱では速度依存性が自然に説明できることを指摘し、Physical Review Letterに出版した。

さらに物質の起源のしくみに必要な物質・反物質非対称性に係る理論の実験的検証可能性を発展させた。宇宙初期の相転移の際にできたとされる「宇宙ひも」から生じる重力波を観察することで、相転移がニュートリノに物質と反物質の入替を可能とさせる従来のレプトジェネシス機構の実証となり、ニュートリノが他の素粒子と比較して非常に小さい質量を持つ謎の解明につながる可能性を提案した。この論文は Physical Review Letters の Editor's Suggestion に選ばれている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 20件/うち国際共著 20件/うちオープンアクセス 20件）

1. 著者名 Chu Xiaoyong, Garcia-Cely Camilo, Murayama Hitoshi	4. 巻 124
2. 論文標題 Finite-Size Dark Matter and its Effect on Small-Scale Structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1 - 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.041101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Dror Jeff A., Hiramatsu Takashi, Kohri Kazunori, Murayama Hitoshi, White Graham	4. 巻 124
2. 論文標題 Testing the Seesaw Mechanism and Leptogenesis with Gravitational Waves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1 - 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.041804	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hamana Takashi, Shirasaki Masato, Miyazaki Satoshi, Hikage Chiaki, et al.(including H.Murayama)	4. 巻 72
2. 論文標題 Cosmological constraints from cosmic shear two-point correlation functions with HSC survey first-year data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1 - 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz138	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hall Eleanor, Konstandin Thomas, McGehee Robert, Murayama Hitoshi, Servant Geraldine	4. 巻 2020
2. 論文標題 Baryogenesis from a dark first-order phase transition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1 - 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2020)042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsuoka Yoshiki, Iwasawa Kazushi, Onoue Masafusa, Kashikawa Nobunari, et al.(including H.Murayama)	4. 巻 883
2. 論文標題 Subaru High-z Exploration of Low-luminosity Quasars (SHELLQs). X. Discovery of 35 Quasars and Luminous Galaxies at $5.7 < z < 7.0$	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1 - 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab3c60	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Chiang Chien-I, Leedom Jacob M., Murayama Hitoshi	4. 巻 100
2. 論文標題 What does inflation say about dark energy given the swampland conjectures?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1 - 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.043505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Henning Brian, Lu Xiaochuan, Melia Tom, Murayama Hitoshi	4. 巻 2019
2. 論文標題 Erratum to: 2, 84, 30, 993, 560, 15456, 11962, 261485, ...: higher dimension operators in the SM EFT	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1 - 2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2019)019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Namikawa T., Chinone Y., Miyatake H., Oguri M., Takahashi R., et al.(including H.Murayama)	4. 巻 882
2. 論文標題 Evidence for the Cross-correlation between Cosmic Microwave Background Polarization Lensing from Polarbear and Cosmic Shear from Subaru Hyper Suprime-Cam	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1 - 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab3424	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Homma Daisuke, Chiba Masashi, Komiyama Yutaka, Tanaka Masayuki, Okamoto Sakurako, Tanaka Mikito, Ishigaki Miho N, Hayashi Kohei, Arimoto Nobuo, Carlsten Scott G, Lupton Robert H, Strauss Michael A, Miyazaki Satoshi, Torrealba Gabriel, Wang Shiang-Yu, Murayama Hitoshi	4. 巻 71
2. 論文標題 Bootes. IV. A new Milky Way satellite discovered in the Subaru Hyper Suprime-Cam Survey and implications for the missing satellite problem	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1 - 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz076	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hikage Chiaki, Oguri Masamune, Hamana Takashi, More Surhud, et al.(including H.Murayama)	4. 巻 71
2. 論文標題 Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime-Cam first-year data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1 - 44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hochberg Yonit, Kuflik Eric, Murayama Hitoshi	4. 巻 99
2. 論文標題 Twin Higgs model with strongly interacting massive particle dark matter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.015005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hochberg Yonit, Kuflik Eric, McGehee Robert, Murayama Hitoshi, Schutz Katelin	4. 巻 98
2. 論文標題 Strongly interacting massive particles through the axion portal	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.115031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Chu Xiaoyong, Garcia-Cely Camilo, Murayama Hitoshi	4. 巻 122
2. 論文標題 Velocity Dependence from Resonant Self-Interacting Dark Matter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.071103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hook Anson, McGehee Robert, Murayama Hitoshi	4. 巻 98
2. 論文標題 Cosmologically viable low-energy supersymmetry breaking	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.115036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tanabashi M., Hagiwara K., Hikasa K., Nakamura K., Murayama H., et al.	4. 巻 98
2. 論文標題 Review of Particle Physics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.030001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yonit Hochberg, Eric Kuflik, Hitoshi Murayama	4. 巻 97
2. 論文標題 Dark spectroscopy at lepton colliders	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical review D	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.055030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Brian Henning, Xiaochuan Lu, Hitoshi Murayama	4. 巻 1
2. 論文標題 One-loop matching and running with covariant derivative expansion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2018)123	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Brian Henning, Xiaochuan Lu, Tom Melia, Hitoshi Murayama	4. 巻 8
2. 論文標題 2, 84, 30, 993, 560, 15456, 11962, 261485, ...: higher dimension operators in the SM EFT	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2017)016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Soo-Min Choi, Yonit Hochberg, Eric Kuflik, Hyun Min Lee, Yann Mambrini, Hitoshi Murayama	4. 巻 10
2. 論文標題 Vector SIMP dark matter	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2017)162	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Brian Henning, Xiaochuan Lu, Tom Melia, Hitoshi Murayama	4. 巻 10
2. 論文標題 Operator bases, S -matrices, and their partition functions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2017)199	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計65件 (うち招待講演 58件 / うち国際学会 55件)

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Testing Seesaw with Gravitational Waves
3. 学会等名 Prospects of Neutrino Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Is Spacetime an Illusion?
3. 学会等名 Kavli Salon "Space, time and the brain" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Dark Sectors and DM Models: from ultralight to ultra heavy
3. 学会等名 the Update of European Strategy for Particle Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Origin of the Complexity in the Universe
3. 学会等名 The 30th Anniversary Todai-Unistra Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Academics beyond disciplines
3. 学会等名 IAU 100th anniversary Symposium (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Inflation, Dark Energy and the Swampland
3. 学会等名 2019 GRC "String Theory and Cosmology: New Physics in the Age of Precision Cosmology" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Particle physics and inflation
3. 学会等名 LiteBIRD Kickoff Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 The Theoretical Perspective on the Future of Particle Physics
3. 学会等名 2019 GRC "New Tools for the Next Generation of Particle Physics and Cosmology" (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Vision of Particle Physics
3. 学会等名 KAIST-KAIX Workshop for Future Particle Accelerators (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 When a Symmetry Breaks
3. 学会等名 Twentyfourth Arnold Sommerfeld Lecture Series (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Fields and Strings Seminar: What is dark matter?
3. 学会等名 Twentyfourth Arnold Sommerfeld Lecture Series (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Testing seesaw and leptogenesis by gravitational waves
3. 学会等名 DESY theory seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Why don't we break apart? Higgs boson and Dark Matter
3. 学会等名 Summer Institute 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Why are There Three Generations?
3. 学会等名 SLAC Summer Institute (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Dark matter candidates and strategies for future
3. 学会等名 TAUP 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 When a Symmetry Breaks
3. 学会等名 University of Texas, Arlington Department Colloquium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Overview of Theoretical Explanations of Dark Matter
3. 学会等名 UCB 290E Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Why PFS is exciting for fundamental physics
3. 学会等名 SUBARU TELESCOPE 20TH ANNIVERSARY (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 PFS collaboration updates
3. 学会等名 11th PFS Collaboration Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Future Particle Experiment , Observation and Simulation
3. 学会等名 Symposium:Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2019) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Approaching the Birth of the Universe
3. 学会等名 Special Lectures on Earth-Space Frontier Science I (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Testing seesaw and leptogenesis by gravitational wave
3. 学会等名 Berkeley Week at Kavli IPMU (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Accelerating Universe Overview
3. 学会等名 Cosmic Acceleration (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 SIMPs
3. 学会等名 New Methods for Dark Matter Discovery (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Standard Model and Beyond
3. 学会等名 The School for Future Electron Positron Colliders (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Overview
3. 学会等名 DESY mini-workshop "Naturalness at Future colliders" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 New Developments on Spontaneous Symmetry Breaking: universal theme to all physics
3. 学会等名 Bethe Colloquium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Twin SIMP
3. 学会等名 TUM theory seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Twin SIMP
3. 学会等名 DESY seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 What do we know about Dark Matter?
3. 学会等名 DESY Particle and Astroparticle Physics Colloquium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 What do we know about Dark Matter?
3. 学会等名 DESY Particle and Astroparticle Physics Colloquium at Berlin-Zeuthen (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 International Linear Collider (ILC250)
3. 学会等名 2018 UT Summer colloquium (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 The Subaru Prime Focus Spectrograph
3. 学会等名 COSPAR2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 SIMP, Hierarchy problem, Quintessence
3. 学会等名 Current Themes in High Energy Physics and Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 de Sitter swampland
3. 学会等名 Arizona Physics seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Cosmology and Dark Matter
3. 学会等名 AEPSHEP school (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Neutrino/Cosmology
3. 学会等名 Double Beta Decay and Underground Science (DBD18) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 ILC/CLIC
3. 学会等名 CEPC Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 When a Symmetry Breaks
3. 学会等名 IBS colloquium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 PFS collaboration updates
3. 学会等名 the PFS collaboration meeting in 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 LiteBIRDの期待される科学的成果と発展性
3. 学会等名 宇宙科学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Swampland viewed from bottom up
3. 学会等名 Accelerating Universe in the Dark (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 When a Symmetry Breaks
3. 学会等名 UC Berkeley Spring Colloquium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Dark Side of the Universe for Everybody
3. 学会等名 CAP2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 PFS challenge for the Science
3. 学会等名 2018 Japan Astronomy Society spring meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Subaru PFS updates
3. 学会等名 WFIRST-Subaru Synergistic Observation Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Hierarchy Problem, Dark Matter, Dark Energy
3. 学会等名 CosPA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Dark Matter and Fundamental Physics
3. 学会等名 the 29th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 PFS collaboration updates
3. 学会等名 9th PFS general collaboration meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Dark Spectroscopy
3. 学会等名 LCWS2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 250GeV ILC will open up a new era of physics
3. 学会等名 2017 Physical Society of Japan autumn meeting (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Will AI Replace Einstein?
3. 学会等名 EINSTEIN INNOVATION SUMMIT (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 The Quest for Dark Matter and Dark Energy
3. 学会等名 Nuclear Science Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Dark Matter : Observation, Theory, Experiment
3. 学会等名 School for Young Nuclear and Particle Physicist Group of Japan (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 TeV frontier in particle astrophysics
3. 学会等名 TeVPA2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 PFS Project Update
3. 学会等名 PFS Meeting in Garching (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 CMB B-mode polarization - Probe the era before the Big Bang
3. 学会等名 17th International Workshop on Low Temperature Detectors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 17th International Workshop on Low Temperature Detectors
3. 学会等名 Highlights from the Particle Physics Gordon Research Conference (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 The Quantum Universe
3. 学会等名 IFAE's 25th anniversary (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Effective Operators
3. 学会等名 2017 Johns Hopkins Workshop "Beyond the Standard Model - Exploring the Frontier" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Pushing the Frontiers of Particle Physics
3. 学会等名 Gordon Research Seminar "Pushing the Frontiers of Particle Physics During the LHC Run2Era" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 宇宙の謎を探る ILC
3. 学会等名 早稲田大学セミナー『加速器と先端計測を駆使して宇宙の謎を探る』(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Subaru and the era of grand surveys
3. 学会等名 The 22nd "Science in Japan" Forum US-Japan Astronomy: Partnerships & Opportunities (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Studying the Cosmos from Underground
3. 学会等名 新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」領域研究会 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Theory vision
3. 学会等名 The Fifth Annual Large Hadron Collider Physics conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

カブリ数物連携宇宙研究機構 https://www.ipmu.jp/ Hitoshi Murayama Home Page http://hitoshi.berkeley.edu/

6. 研究組織		
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)
		備考