

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03942

研究課題名（和文）重力波で探る物質の起源

研究課題名（英文）Search for the Origin of Matter using Gravitational Waves

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）：宇宙の始まりでは物質と反物質が同数できたが、なぜか10億分の1のズレが生まれ、10億の物質と反物質は全て出会って消滅し、ズレの部分だけが残って星や我々の体を作っている。このズレができた仕組みは、我々の存在に関わる現代宇宙論の最大の謎である。今まで提唱された有力な理論ではビッグバン直後の極高温で起きたと考えられていて、直接実験では検証できない。村山は2015年に発見された重力波を使うとビッグバン直後の宇宙を「観る」ことができ、理論の検証ができる可能性を提案した。一方もっと低い温度で物質と反物質ズレを説明する理論では物質・反物質のズレと暗黒物質が関係する可能性があり、具体的な理論を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々はなぜ存在するのか、は哲学・神学から現代物理学にまたがる人類共通の問いである。この問いを自然科学の対象にするためには、具体的な理論と、それを検証する実験的な手法の両方が必要である。本研究では、まず宇宙初期に同数できた物質と反物質にズレをつくり、我々を完全消滅から救ってくれた仕組みに注目した。一般にビッグバン直後のことを直接実験的に検証するのは難しいが、重力波を用いて理論を検証する可能性があることを指摘し、定量的にその信号を予言した。一方暗黒物質も星や銀河を作った主役として私たちの存在に欠かせない存在だが、両方が関係する可能性がある。具体的な理論を提案し、重力波での検証の可能性を指摘した。

研究成果の概要（英文）：When the Universe started, the same amount of matter and anti-matter was born. However, there emerged an imbalance of one part in billion. A billion of matter and anti-matter met and annihilated with each other, while the imbalance remained to date and formed stars and our bodies. How this imbalance emerged is the biggest mystery in modern cosmology that is directly tied to our existence. Most theories proposed to date assume that the imbalance emerged at extremely high temperatures right after the Big Bang, and we cannot test them experimentally. Murayama pointed out that gravitational wave, discovered in 2015, can observe the Universe all the way back to the Big Bang and can test such theories. On the other hand, theories that explain the imbalance at much lower temperatures may be well connected to dark matter, and Murayama proposed such theories.

研究分野：素粒子物理

キーワード：素粒子 原子核 宇宙線 反物質 暗黒物質

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

物質の起源=「私たちはどこから来たのか」という問いは人類何千年来の根源的な問いである。その一部である原子の起源については、近年のプランク衛星などによる宇宙背景放射の研究が水素・ヘリウム比を測定することで、今までの天文観測による原始元素比と基本的に一致した。これで宇宙が一秒歳から三分歳のころに熱いプラズマの中で、陽子と中性子が合体し始め、まずは重水素、そしてヘリウム、若干のリチウムが作られたと予言する、ビッグバン元素合成理論を改めて検証した。

一方それより大きな元素は星の中で核融合反応でつくられ、大きめの星の場合はその生涯の終わりに超新星爆発を起こすことで宇宙空間に拡散されたと考えられている。実際、日本のスーパーカミオカンデなどの実験が太陽の中心で起きている核融合反応の際に副産物として生まれるニュートリノの観測に成功した。長年太陽ニュートリノの数が理論的予想よりも1/3から1/2と少ないことが大きな謎であったが、提案者自身が関わった日本のカムランド実験が原子力発電所から放出されるニュートリノの振動を発見し、そのパラメータで太陽ニュートリノの振動前の数を割り出すと、理論的な予想とよく合うことがわかった。一方、カニ星雲のような超新星残骸を、JAXAの「すざく」X線観測も含めた分光観測により、様々な元素が放出されていることも確認され、カミオカンデの超新星SN1987Aからのニュートリノの観測もあり、この考え方も確立された。

星の中の熱核融合反応で作られるのは、核子あたりの結合エネルギーが最大になる鉄までで、それ以上大きな原子核は吸熱反応となるため反応が進まない。より大きな金・銀・銅・白金・ヨウ素といった元素を作るのは別の環境が必要である。一時は超新星爆発の際の吹き飛ばされる中性子が中性子過剰核をつくり、その崩壊から安定重元素ができると考えられたが、その後詳細な計算により、ニュートリノの風が中性子を陽子に変えてしまい、うまくいかないことがわかってきた。そこで注目されたのが超新星の残骸として残る中性子星が連星になっている系で、重力波を出して落ち込んで合体する際に、中性子過剰核が多く造られるという可能性だ。実際重力波が検出されたイベントGW170817は、直後にγ線バーストが観測され、その後X線、可視光、赤外線、電波と徐々に波長を変えていったことがわかり、赤外線の吸収が強いランタナイドの元素が多く作られた可能性を強く示唆している。これで周期表全ての元素の起源がかなりはっきりした。

しかし、ビッグバンの巨大なエネルギーが物質になる際には、つねに物質と反物質が1:1で作られたはずである。だとすると、いずれ物質と反物質はまた出会うと1:1で消滅し、元素を形作る陽子、中性子、電子はなくなってしまったはずである。(消滅断面積は有限なので完全には無くならないが、今観測されている量よりもおよそ10桁も少なくなったはずである。)ビッグバン元素合成の理論でも、宇宙背景放射の観測でも、物質と反物質の間に10億分の1程度のずれがあったことがはっきりしており、両者の結論は合致している。このずれがないと、現在の宇宙に元素がなかったことになり、「私たちはどこから来たのか」という問いに答えることができない。これが物質・反物質非対称性の問題である。

これを宇宙の初期条件として非対称性があったという主張も以前はありえたが、今はこれも考えにくい。宇宙背景放射や銀河分布の観測から、宇宙の構造の起源としてインフレーション中の量子ゆらぎがもともなったという理論がほぼ唯一の可能性に絞られた。インフレーションは誕生直後の宇宙を少なくとも22桁も大きくしたと考えられており、どんなに大きな宇宙初期

条件の非対称性も完全に薄められてしまう。つまりインフレーションが終わり、宇宙の再熱化以降に、物理過程として非対称性を作り出す必要がある。

これを説明するには、当時ソビエトの物理学者サハロフが提唱した三つの条件が必要になる。

- (1) バリオン数を破る相互作用の存在
- (2) C、およびCP対称性の破れ
- (3) 平衡からの逸脱

まず(1)については実験的にはみつかっていないものの、理論的には標準模型でバリオン数とレプトン数はそれぞれ量子異常によって破れていて、その差が保存されていることがわかっている。(2)については実験的には破れははっきりしており、その後日米の競争となったB工場実験により、小林・益川理論が証明された。それは一方、標準模型のC、CPの破れだけでは、 10^{-26} 以下の非対称性しか作れないことを証明したことにもなり、新たなC、CPの破れが必要であることが確定した。(3)については初期宇宙での長寿命の粒子や第一次相転移が可能性として指摘されている。

この状況の中で、二つの考え方が世界で主流となった。一つは、レプトジェネシスと呼ばれる福来・柳田の提案である。スーパーカミオカンデで(左巻きの)ニュートリノの質量が発見され、他のどの物質粒子に比べても極めて小さい0.1eVの値である。これを自然に説明するには、逆に109から1015GeVという極めて重い右巻きニュートリノが存在するというシーソー模型がよく知られている。この重い右巻きニュートリノはとても加速器実験で作ることはできないが、宇宙初期に作られ、寿命が長めであると、しばらく存在したのちに崩壊するため、化学平衡を逸脱する。しかもこの模型ではレプトン数を破るので、C、およびCPの破れを拾って崩壊時に物質と反物質への分岐比が1:1からずれる。その結果レプトン数の非対称性が生まれ、それが量子異常によりバリオン数に転化する、という説である。これは高いエネルギーでおきるため、実験的な検証がむずかしい。

もう一つは、電弱バリオジェネシスと呼ばれる。LHC実験で見つかったヒッグス粒子が真空中に凝縮した電弱相転移が第一次相転移だったとすると、水蒸気が液化するときのように二つの相がしばらく共存する。これが平衡からの逸脱となる。トップクォークなどの粒子が二つの相の間にある壁で散乱される際にC、CPの破れを拾って非対称性がうまれると、標準模型の量子異常によりレプトン数とバリオン数に分配される、という説である。この場合、電弱スケールでの物理なので、加速器実験などで検証が可能であるという期待があり、魅力的である。しかしLHC実験でヒッグス粒子以外の新粒子が見つからないため、第一次相転移の可能性はむずかしくなり、また低エネルギーでの電子や原子の電気双極子について近年一桁厳しい制限がACME実験によって与えられ、この説はほぼ排除されるに近い状況になっている。

この元素をつくる物質の起源に加えて、もう一つの大きな謎は暗黒物質である。インフレーションで作られた量子ゆらぎが「古典化」して 10^{-5} 程度の宇宙の密度揺らぎとなり、それを暗黒物質の重力で育て、いずれジーンズ不安定性によってつぶれ、宇宙の星や銀河という構造ができたと考えられている。暗黒物質の存在は銀河の回転曲線、銀河団内での銀河の運動や重力レンズ効果、宇宙背景放射の観測から、疑いがない。しかしその正体は全く不明であり、その質量については70桁もの可能性がある。この暗黒物質の正体を特定し、その生成の機構をあきらかにすることも、まさに「私たちはどこから来たのか」=物質の起源に直結する。

2. 研究の目的

重力波はアインシュタインの百年前の予言を受けて2015年に発見され、すでにノーベル賞も授与されている。重力波を使った宇宙の研究は始まったばかりである。本研究は最新の観測に基づく宇宙論と素粒子物理学の進展に基づき、この新しい重力波というツールを用いて、特に宇宙初期での物質の起源に関わる謎を探求する手法を研究する。

3. 研究の方法

本研究では、元素を作る物質の起源をあきらかにするために、現在主流であるレプトジェネシスと電弱バリオジェネシスの二つの説に注目する。

レプトジェネシスについては、加速実験をはるかに超えるエネルギーで起きたと考えられるため、新たなプローブが必要になる。この説で必要な109から1015GeVという極めて重い右巻きニュートリノの模型を詳細に見ると、その半数以上の可能性では、右巻きニュートリノのエネルギースケールで新しい対称性の破れの相転移があり、その際宇宙ひもが生成されることが、提案者の最近の研究でわかった。丁度Type IIの超伝導体でU(1)の電磁ゲージ対称性が破れる際に、磁束が突き抜けるアブリコソフ渦が生まれるのと同じように、ゲージ対称性の自発的な破れに伴ってある種の磁束の渦が生まれる。これが宇宙ひもである。

宇宙ひものネットワークは、地平線の内側にあるものについてはエネルギーを下げるように自己簡素化しようとするため、スケール不変な自己相似性のある振る舞いをするのが知られている。まずはその振る舞いから期待される、ストカスティックな重力波の大きさとスペクトルを調べる。今後、重力波望遠鏡のLIGO、VIRGO、日本のKAGRA、将来のLIGO-India、また電波領域のPulsarTiming Array、将来のSKA、そして宇宙に打ち上げる重力波検出の衛星のシステムとしてLISA、BBO、日本のDECIGOなどの計画があり、そこでの感度と比較して、検証可能性を検討していく。レプトジェネシスで必要なエネルギースケールの範囲では、検証可能性はあると考えているので、これをはっきりさせる。

ここで作られる宇宙ひもは、多くの模型でZ2のトポロジーを持ち、よく調べられているU(1)のトポロジーとは異なる。こうした離散的なトポロジーで安定なソリトン解が生まれるのは、先行研究が少なく、特にZ2のトポロジーの宇宙ひもについてはほとんどない。提案者の調べではU(1)の場合と違って、Z2のトポロジーを具体的に場で実現するためには、強い相互作用のゲージ対称性であるカラーSU(3)対称性を破ることがわかってきた。こうした理論的な問題をはっきりさせる。

これを確認できた場合、温度がカラー閉じ込めの相転移温度に近づいてくると、ひもの間に強い力が働くようになり、ある温度でバースト的にひものネットワークが崩壊し、重力波のスケール不変なスペクトルがブチッと切れる可能性がある。これは観測にかかる可能性が高い。このダイナミクスは非摂動的効果なので難しいが、ある程度予想を打ち立てる。

一方電弱バリオジェネシスの方は、まずは現実的な模型の構築から始める。ACME実験からの制限を逃れるため、検討するのは「暗黒」ゲージ対称性があり、その第一次相転移で非対称性を作る可能性である。この場合、「暗黒」ゲージ理論で生まれた非対称性を標準理論に受け渡すポータル（窓）が必要となるが、今までは高いエネルギーの粒子による有効演算子を使う可能性が提案されていた。提案者は予言力のある模型を作るために、繰り込み可能な理論としてニュートリノ・ポータルを考えている。具体的な模型が現在の制限をきちんと逃れられるかどうかを明らかにする。

このように物質の起源について、物質・反物質の非対称性および暗黒物質の正体と起源について、模型を具体的に構築し、理論的に未解明な点の解明を目指す。

4. 研究成果

Leptogenesis機構の多くの理論でcosmic stringのネットワークができることはすでに2020年1月、“Testing the Seesaw Mechanism and Leptogenesis with Gravitational Waves” *Phys. Rev. Lett.* 124 (2020) 4, 041804で指摘した。しかし実験的な検証のためには、そのcosmic stringから作られる重力波の信号の大きさとスペクトルの詳細を知る必要がある。

Wilfried Buchmüller, Valerie Domcke, Kai Schmitzとの共同研究では、大統一理論の中でのleptogenesisで作られるcosmic stringのネットワークは、大統一理論の重要な予言であるmagnetic monopoleの存在のため、ひもが切れ、消滅することに気づいた。そのため重力波の長波長側が本来宇宙ひもで期待される波長よりも短いところで終わってしまうことになる。つまり重力波の信号の強さが宇宙ひもを作る相転移の温度を決め、一方その温度の割には長い波長まで信号が続かない場合、magnetic monopoleの存在の証拠となり、大統一理論の検証につながる。

さらにcosmic stringとmagnetic monopoleだけではなく、domain wallとcosmic stringでも同じようなことが起きうる。一般的にあるtopological defectが別のtopological defectでboundされるような場合の重力波には特徴的なスペクトルが現れることを予言した。今後重力波で宇宙初期を探る研究では重要なポイントとなる。

一方、electroweak scaleでの相転移からbaryogenesisが起きる場合は、neutrino portalでstandard modelとdark sectorを繋ぐことにより、asymmetric dark matterに可能性が生まれる。まずは具体的な簡単な理論を構成し、提案した。通常文献ではasymmetric dark matterは6GeV程度の質量だと考えられてきたが、具体的な理論で見ると、むしろ1.5GeV程度、あるいは30GeV程度となる。このため直接検出実験でのasymmetric dark matterの探索の戦略が変わってくる。そしてdark sectorの相転移はelectroweakとQCDに相当する二つの可能性があるため、重力波のスペクトルにも二つのピークが現れるかもしれない。これはこうした理論の検証に重要なポイントとなる。

さらにこの理論ではstandard modelのHiggs bosonとdark sectorのHiggs bosonが一般に混合するため、将来ILC、FCC-eeなどのHiggs factoryで125GeVのHiggs bosonがdark sectorの粒子に崩壊し、dark sectorの π^0 がdark photonを通じてlepton pairになるため、missing+low-mass-lepton-pairという特徴的なexotic decayが予言される。

他にも関連するdark matterやgauge theoryに関する理論を含め、計28件の査読付き論文を出版した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計28件（うち査読付論文 28件 / うち国際共著 27件 / うちオープンアクセス 27件）

1. 著者名 Frumkin Ronny, Hochberg Yonit, Kuflik Eric, Murayama Hitoshi	4. 巻 130
2. 論文標題 Thermal Dark Matter from Freeze-Out of Inverse Decays	5. 発行年 2023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.130.121001	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	4. 巻 107
2. 論文標題 Asymmetric matter from a dark first-order phase transition	5. 発行年 2023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.107.055011	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 Csaki Csaba, Gomes Andrew, Murayama Hitoshi, Noether Bea, Roy Varier Digvijay, Telem Ofri	4. 巻 107
2. 論文標題 Guide to anomaly-mediated supersymmetry-breaking QCD	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.054015	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 Graf Lukas, Henning Brian, Lu Xiaochuan, Melia Tom, Murayama Hitoshi	4. 巻 2023
2. 論文標題 Hilbert series, the Higgs mechanism, and HEFT	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	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) 10.1007/JHEP02(2023)064	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 Csaki Csaba, Gomes Andrew, Hochberg Yonit, Kuflik Eric, Langhoff Kevin, Murayama Hitoshi	4. 巻 2022
2. 論文標題 Super-resonant dark matter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2022)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 Dunsky David I., Ghoshal Anish, Murayama Hitoshi, Sakakihara Yuki, White Graham	4. 巻 106
2. 論文標題 GUTs, hybrid topological defects, and gravitational waves	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.075030	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, McGehee Robert, Murayama Hitoshi, Suter Bethany	4. 巻 106
2. 論文標題 Asymmetric dark matter may not be light	5. 発行年 2022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.106.075008	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 Kondo Dan, McGehee Robert, Melia Tom, Murayama Hitoshi	4. 巻 2022
2. 論文標題 Linear sigma dark matter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2022)041	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 Barrie Neil D., Han Chengcheng, Murayama Hitoshi	4. 巻 2022
2. 論文標題 Type II Seesaw leptogenesis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP05(2022)160	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 Tsai Yu-Dai, McGehee Robert, Murayama Hitoshi	4. 巻 128
2. 論文標題 Resonant Self-Interacting Dark Matter from Dark QCD	5. 発行年 2022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.128.172001	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 Barrie Neil D., Han Chengcheng, Murayama Hitoshi	4. 巻 128
2. 論文標題 Affleck-Dine Leptogenesis from Higgs Inflation	5. 発行年 2022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.128.141801	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 Croon Djuna, Elor Gilly, Houtz Rachel, Murayama Hitoshi, White Graham	4. 巻 105
2. 論文標題 Light dark matter through resonance scanning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	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/PhysRevD.105.L061303	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 Yoshiki Matsuoka et al	4. 巻 259
2. 論文標題 Subaru High-z Exploration of Low-luminosity Quasars (SHELLQs). XVI. 69 New Quasars at $5.8 < z < 7.0$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac3d31	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 94
2. 論文標題 Outer automorphism anomalies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2022)094	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 C.Csaba, Murayama Hitoshi, Telem Ofri	4. 巻 105
2. 論文標題 More exact results on chiral gauge theories: The case of the symmetric tensor	5. 発行年 2022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.105.045007	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 C.Csaba, Gomes Andrew, Murayama Hitoshi, Telem Ofri	4. 巻 104
2. 論文標題 Phases of nonsupersymmetric gauge theories: The $SO(N_c)$ case study	5. 発行年 2021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.104.114018	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 C.Csaba, Gomes Andrew, Murayama Hitoshi, Telem Ofri	4. 巻 127
2. 論文標題 Demonstration of Confinement and Chiral Symmetry Breaking in $S_0(N_c)$ Gauge Theories	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.251602	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 Garcia-Bellido Juan, Murayama Hitoshi, White Graham	4. 巻 23
2. 論文標題 Exploring the early Universe with Gaia and Theia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 1-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/12/023	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 C.Csaba, Murayama Hitoshi, Telem Ofri	4. 巻 104
2. 論文標題 Some exact results in chiral gauge theories	5. 発行年 2021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.104.065018	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 Murayama Hitoshi	4. 巻 126
2. 論文標題 Some Exact Results in QCD-like Theories	5. 発行年 2021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.126.251601	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 -

1. 著者名 Dror Jeff A., Murayama Hitoshi, Rodd Nicholas L.	4. 巻 103
2. 論文標題 Cosmic axion background	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.115004	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 Fukuda Hajime, Manohar Aneesh V., Murayama Hitoshi, Telem Ofri	4. 巻 52
2. 論文標題 Axion strings are superconducting	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP06(2021)052	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 42
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 Harigaya Keisuke, McGehee Robert, Murayama Hitoshi, Schutz Katelin	4. 巻 155
2. 論文標題 A predictive mirror twin Higgs with small Z2 breaking	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP05(2020)155	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 43
2. 論文標題 A practical and consistent parametrization of dark matter self-interactions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/06/043	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 Kawasaki Masahiro, Kohri Kazunori, Moroi Takeo, Murai Kai, Murayama Hitoshi	4. 巻 48
2. 論文標題 Big-bang nucleosynthesis with sub-GeV massive decaying particles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 1-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/12/048	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 Buchmuller Wilfried, Domcke Valerie, Murayama Hitoshi, Schmitz Kai	4. 巻 809
2. 論文標題 Probing the scale of grand unification with gravitational waves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	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) 10.1016/j.physletb.2020.135764	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 L.Graf, Henning Brian, Lu Xiaochuan, Melia Tom, Murayama Hitoshi	4. 巻 142
2. 論文標題 2, 12, 117, 1959, 45171, 1170086, ...: a Hilbert series for the QCD chiral Lagrangian	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	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) 10.1007/JHEP01(2021)142	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55件(うち招待講演 51件/うち国際学会 50件)

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 P5 Process and Progress
3. 学会等名 P5 Town Hall at FNAL/ANL (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Where do we come from? Perspectives from Physics
3. 学会等名 Interdisciplinary Science Conference in Okinawa(ISC02023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 New Opportunities
3. 学会等名 P5 Town Hall at LBNL (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 The Higgs boson: particle superhero and a tour guide to new particles
3. 学会等名 Particle Physics New Year Lecture in Oxford Univ. D.Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Keynote Theory
3. 学会等名 KEK QUPosium 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Understanding gauge theories using anomaly mediation
3. 学会等名 APCTP colloquium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Theory vision
3. 学会等名 The 2022 International Workshop on the High Energy Circular Electron Positron Collider (CEPC workshop) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 non-perturbative Quantum field theories
3. 学会等名 HirosiFest (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Cosmology Lecture1-3
3. 学会等名 AEPSHEP 2022 School (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Does the World need a new particle collider - and why?
3. 学会等名 European Committee for Future Accelerators Public Lecture (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Quantum Field Theory concepts
3. 学会等名 DESY Theorie Workshop "HIGGS, FLAVOR AND BEYOND" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Where do we come from? Perspective from Physics
3. 学会等名 HERTZ LECTURE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 How Future Plans Are Discussed in the United States
3. 学会等名 2022 GOPIRA symposium (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Solve gauge theory using supersymmetry
3. 学会等名 Progress in Particles Physics 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Higgs as a window to the dark sector
3. 学会等名 Program for the 34th Regular Meeting of the New Higgs Working Group (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Panel discussion: Theory and the Cosmic Frontier
3. 学会等名 Seattle Snowmass 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Model Building Into the Future
3. 学会等名 Seattle Snowmass 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Theory vision: the questions before us
3. 学会等名 Seattle Snowmass 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 New ideas and signatures in electroweak-scale model building
3. 学会等名 The Tenth Annual Large Hadron Collider Physics (LHCP2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Fun with composite dark matter
3. 学会等名 2022 CAU BSM (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Some exact results in gauge theories
3. 学会等名 the Oxford Theoretical Particle Physics seminar series (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Quantum Universe
3. 学会等名 An International Webinar on Physics at Pabna University of Science and Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 The physics of the Universe
3. 学会等名 Symposium IN2P3 50th anniversary (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Communication on the case for at least a future collider beyond the LHC
3. 学会等名 ILC Workshop on Potential Experiments (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Supersymmetry as a tool to study quantum systems
3. 学会等名 International Symposium on Trans-scale Quantum Science(TSQS 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Some Exact Results in QCD-like and Chiral Gauge Theories
3. 学会等名 KEK seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Why SUSY is great
3. 学会等名 SUSY 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Can we "solve" gauge theories?
3. 学会等名 Strings and Fields 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Baryogenesis
3. 学会等名 Pre-SUSY lecture Special session 2 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Higgs invisible and exotic decays from baryogenesis and asymmetric dark matter
3. 学会等名 Program for the 30th Regular Meeting of the New Higgs (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Some Exact Results in QCD-like and Chiral Gauge Theories
3. 学会等名 Osaka University DP seminar (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Quantum Universe
3. 学会等名 the 26th International Symposium on Particle Physics, String Theory, and Cosmology (PASCOS 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Some Exact Results in QCD-like and Chiral Gauge Theories
3. 学会等名 Enrico Fermi Institute Particle Theory Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Superconducting axion string and Cosmic axion background
3. 学会等名 Invisibles 2021 workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Some Exact Results in QCD-like and Chiral Gauge Theories
3. 学会等名 East Asian Strings Webinar Series 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Future prospect of high energy physics
3. 学会等名 US-Japan Hawaii Symposium of the US-Japan Science and Technology Cooperation Program (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Two tales of baryogenesis
3. 学会等名 CERN Theory Colloquium (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 Strongly Interacting Dark Matter
3. 学会等名 Fermilab Particle Astrophysics Seminar (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 ILC
3. 学会等名 Reseed Progress Meeting (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 Dark Colors
3. 学会等名 RECONNECT 2020 (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 Theory Overview
3. 学会等名 LHC 2020 (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 Origin of matter and gravitational wave
3. 学会等名 SISSA IFPU Colloquium (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 Higgs Physics Open Questions and New Ideas
3. 学会等名 Snowmass energy frontier workshop (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 Dark Energy and Dark Matter with Subaru Telescope
3. 学会等名 "Dark Energy in a Dark Age" Lecture Series (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 From inflationary universe to primordial gravitational waves
3. 学会等名 Dirac Lecture series (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 The Higgs boson and the understanding of the Universe
3. 学会等名 Higgs 2020 (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 In search of our roots: Neutrinos, gravitational waves, dark matter
3. 学会等名 The World of Mathematical Physics (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 Recent Topics in Particle Physics
3. 学会等名 Strings and Fields (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 Particle physics and cosmology
3. 学会等名 Physics intensive course (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 The Prime Focus Spectrograph
3. 学会等名 American Astronomical Society 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Dark matter
3. 学会等名 Beyond the Standard Model Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Overview
3. 学会等名 What is dark matter? Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 International Linear Collider Project
3. 学会等名 JPS Annual meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 IDT WG3 introduction and plans
3. 学会等名 LCWS2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Murayama
2. 発表標題 Higgs and Dark Sector
3. 学会等名 HPNP2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 村山 斉	4. 発行年 2021年
2. 出版社 幻冬舎	5. 総ページ数 232
3. 書名 宇宙はなぜ美しいのか カラー新書	

〔産業財産権〕

〔その他〕

カブリ数物連携宇宙研究機構
<https://db.ipmu.jp/member/personal/17ja.html>
 カリフォルニア大学バークレー校物理学教室
<https://physics.berkeley.edu/people/faculty/hitoshi-murayama>
 PFSプロジェクト
<https://pfs.ipmu.jp/blog/ja/>
 学術変革「ダークマター」
<https://member.ipmu.jp/DarkMatter/>
 カブリ数物連携宇宙研究機構
<https://db.ipmu.jp/member/personal/17en.html>
 カリフォルニア大学バークレー校物理学教室
<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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	カリフォルニア大学バークレー校	ローレンス・バークレー国立研究所	コーネル大学	他8機関
スイス	スイス連邦工科大学ローザンヌ校	ジュネーブ大学		
スペイン	マドリッド自治大学	バルセロナ大学		
ドイツ	マックス・プランク天体物理学研究所	DESY		
台湾	台湾中央研究院			
オーストリア	オーストリア科学アカデミー			
カナダ	TRIUMF			