

【本件リリース先】

文部科学記者会、科学記者会、
広島大学関係報道機関



広島大学

NEWS RELEASE

広島大学広報グループ
〒739-8511 東広島市鏡山 1-3-2
TEL : 082-424-3749 FAX : 082-424-6040
E-mail: koho@office.hiroshima-u.ac.jp

令和2年9月17日

記者説明会（9月18日（金）13時30分・東広島キャンパス）のご案内

※「Zoom」での参加も可能です

高強度レーダー混合による宇宙暗黒成分の革新的観測手法の発案

～ 未知素粒子群発見への突破口を開けるか ～

【本研究成果のポイント】 自然界の4つの力のうち、素粒子原子核実験で見出された3つの力の強さと比べ、重力だけが特別に弱く、その物質との結合の強さは33桁以上乖離しています。重力に感度をもつ宇宙観測から、暗黒物質と暗黒エネルギーが宇宙全体のエネルギー密度収支の95%を占めていることがわかっていますが、これらの暗黒成分はこの乖離した未観測領域に潜んでいる可能性があります。本研究は、この未踏領域を埋められる革新的な観測手法を、科学史上初めて提唱しました。

本研究成果について、下記のとおり記者説明会を開催いたします。ご多忙とは存じますが、是非ご参加いただきたく、ご案内申し上げます。

記

日 時：令和2年9月18日（金）13時30分～14時30分（13時から受付）

場 所：広島大学東広島キャンパス（東広島市鏡山 1-4-1）

工学部小会議室

説明者：広島大学 大学院先進理工系科学研究科（物理学プログラム）

助教 本間 謙輔

【概要】 広島大学大学院先進理工系科学研究科の本間謙輔助教と同大学大学院理学研究科の桐田勇利大学院生は、現代宇宙物理学における最大級の謎である暗黒物質や暗黒エネルギーの源となり得る未知の軽い素粒子群を、2波長の光波から成る強力なレーダーを真空中で混ぜ合わせ、未知素粒子群を介した散乱を誘導することにより、直接的にそれらを生成・崩壊させる実験手法を精密に定量化しました。その上で、この観測手法が従来の素粒子観測手法の弱結合に対する感度を桁違いに更新し、重力よりも弱い素粒子結合領域にすれすれを入れることを明らかにしました。本観測手法は、今後、宇宙の暗黒成分となり得る重力的に弱く結合する未知の軽い素粒子群を直に検証し得る展望を与えます。

【論文情報】 本研究の成果は、欧州の科学雑誌「Journal of High Energy Physics」に2020年9月15日に掲載されました。

論文タイトル：Stimulated radar collider for probing gravitationally weak coupling

pseudo Nambu-Goldstone bosons

著者名：本間謙輔^{1,2*}、桐田勇利²

所属：¹ 広島大学大学院先進理工系科学研究科、² 広島大学大学院理学研究科

DOI: 10.1007/JHEP09(2020)095

【背景】 宇宙は光り輝く星々とその背後にある漆黒の空間で構成されています。星々は原理的には素粒子群に還元できます。しかし、既知の素粒子群、つまり、観測可能な星々が持つエネルギーは、宇宙全体のエネルギー密度収支の 5%程度しか満たせないことが、最先端の宇宙観測から判明しています。残りの 95%は重い星々の周囲にまとわりつく暗黒物質、および、宇宙全体を膨張させる要因と考えられる暗黒エネルギー(あるいは宇宙項)で満たされているという見解が、現代宇宙論の標準的パラダイムです。つまり、星々の背後にある原子を除いた真空の連なりに暗黒成分が潜んでいると考えられます。

自然界に存在が確認されている力をその強さの順で並べると、現在のところ、「強い力(核力)」、「電磁気力」、「弱い力(原子核崩壊を促す力)」、「重力」の4種類です。重力以外の3つの力については、加速器内の荷電粒子衝突による散乱実験で直接検証されてきましたが、重力だけは仲間外れでした。その理由は、一対の素粒子間の重力的結合は極めて弱く、素粒子間に働く最も「弱い力」の結合と比べてみても、「重力」の結合は 33 桁も弱いためです。結合が弱いということは、素粒子間の散乱は滅多に起こらないということを意味します。したがって、重力を散乱現象として顕在化させるには、散乱の試行回数を膨大に上げる、つまり、膨大な素粒子群同士を関与させる必要があります。事実、アボガドロ数(10^{23} 個程度)以上の原子群を含む巨視的な物体の落下現象や天体現象によってのみ、重力が観測されてきました。このような「重力の窓」を通じて観測された宇宙暗黒成分を、重力以外の3つの力にしか感度を持たない素粒子標準模型内で説明できないのは、当然かも知れません。従来、この 33 桁以上のギャップを埋める観測手法が切望されていながら、科学史上、散乱現象を通じて観測する手法を誰も発案できていませんでした。

素粒子標準模型において待望されていたヒッグス粒子は、2012年に加速器内の陽子と陽子の衝突で作られ、その2つの光子への崩壊によって最も顕著に観測されました。ヒッグス粒子は、それが従うポテンシャルエネルギー¹⁾の坂を転がる際に**自発的に対称性を破る**²⁾結果、質量を獲得する粒子であり、特にその真空中で自己凝縮する性質により、真空の抵抗として他の素粒子群に質量を与える重要な役割を担っています。この自発的対称性の破れという観念は、南部博士により提唱され、その観念を基礎にしたのがヒッグス博士の理論模型でした。南部博士は2008年に、ヒッグス博士は2013年にノーベル物理学賞を受賞しています。

ヒッグス粒子の発見は、本研究に2つの柱を与えます。第一に、対称性を刻印できる物理的実体、つまり、未知なるポテンシャルエネルギーが、真空中に潜んでいた点です。これは宇宙暗黒成分を、一般的に未知のポテンシャルエネルギー形態とみなす見解を支持します。第二に、自発的に対称性を破る際、ヒッグス粒子のように質量の重い粒子と同時に、原理的には質量の無い素粒子も生成し得るという**南部-ゴールドストーン定理**³⁾の妥当性が間接的に示された点です。ヒッグス粒子は、ゲージ対称性の破れに伴う重い粒子ですが、自発的対称性の破れの結果、質量の極めて軽い粒子が同時に生成され得るという主導原理は、一般的にどのような大域的対称性にも適用可能です。実際、南部博士はこの主導原理をパイ中間子に適用し、その質量が特別に軽い理由として、カイラル対称性を自発的に破る結果で生じた**擬南部-ゴールドストーン粒子(pNGB)**³⁾であるためだと結論づけたのです。

自然界には、未だ人類が気づいていない対称性も存在することでしょう。この主導原理に基づけば、何らかの対称性が自発的に破れた結果、非常に軽い粒子群が生まれる可能性があります。しかし、これらの軽い粒子が物質と重力的にしか結合しないので

あれば、加速器実験でこれらを検証することは、ほぼ不可能です。翻って、もしも、重力的に弱くしか結合しない軽い粒子群を、革新的な手法で直接生成できるのならば、人類は現在の素粒子標準模型の地平線を超えられるでしょう。

【研究成果の内容】 本研究では、特に暗黒物質や暗黒エネルギー源として有望視されている μeV ($\mu\text{eV}=100$ 万分の 1 電子ボルト) 付近の質量領域の pNGB を直接生成することを念頭におきました。重力結合領域へ到達するために必要となる諸条件を求めため、素粒子反応率を計算する理論形式を整え、数値計算を実施しました。その上で、その諸条件を満たすべく、以下のような実験セットアップを考案し、その実現可能性を定量的に議論しました。

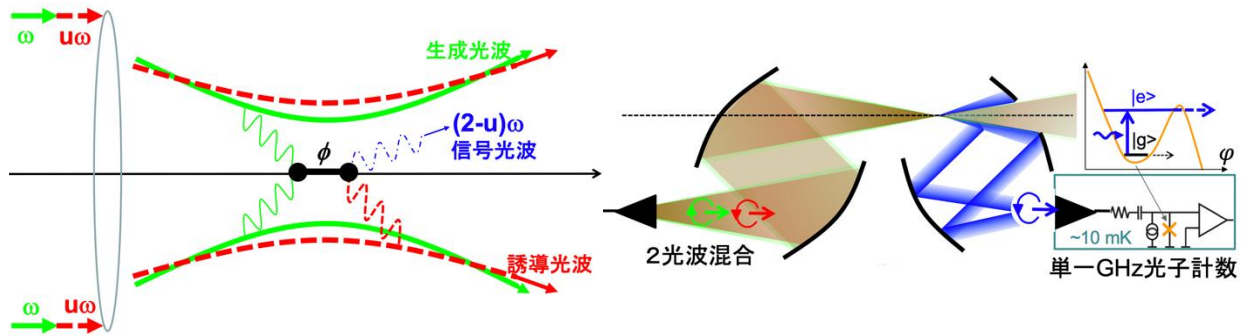


図 1

図 2

図 1 : ω (生成) + ω (生成) \rightarrow ϕ (NGB) \rightarrow $u\omega$ (信号) + $(2-u)\omega$ (誘導) の誘導共鳴散乱。

図 2 : 生成用と誘導用の 2 つのレーザー光波を同軸上で混合集光後、真空中で集光点の辺縁に生成された信号光波を超伝導デバイスで計数する実験セットアップの概念図。

衝突エネルギーが pNGB 質量と一致すると pNGB は共鳴的に作られるため、できるだけ軽い pNGB を生成できるように、質量のない粒子、すなわち、光子をかすり衝突させることを考えました。しかし、pNGB が暗黒成分である限り、たとえ生成されてもその寿命は長く崩壊しないため、結局何も検知できません。そこで 2 色のコヒーレント光波⁴⁾ビームを真空中で混合かつ集光する誘導共鳴散乱(図 1)を考案しました。真空のキャンバスに緑と赤を混ぜて青を探す手法です。より一般的には、エネルギー ω (緑) の光子ビーム内で起こる準平行系衝突において $\omega + \omega \rightarrow \phi$ (pNGB) $\rightarrow u\omega + (2-u)\omega$ という pNGB を介した散乱に着目します ($0 < u < 1$)。この時、コヒーレント光波 $u\omega$ (赤) を事前に混合しておく、エネルギー・運動量保存から信号光波 $(2-u)\omega$ (青) を誘導⁵⁾ できます。光子ビームの集光強度には物理的上限がありません。アボガドロ数を超える巨大光子数も現在の技術で到達できます。この誘導共鳴散乱の確率が、ビーム中の光子数の 3 乗に比例することを踏まえると、重力結合域へと感度が至る見込みが出てきます。

これまでにレーザービーム ($\omega \sim 1\text{eV}$) を用いた探索を実施してきましたが^[1]、 $0.1\text{--}1\mu\text{eV}$ の質量領域、かつ、重力的結合域にある pNGB を探索するには少なくとも $\omega \sim 10\mu\text{eV}$ まで下げる必要が生じます。このような光源は、既に荷電粒子加速器の高周波源やレーザー光源として実存しているものを利用可能ですが、そのままでは重力的に弱い結合域までは感度が届きません。そこで鍵となる要素は、GHz 帯光波ビームのフーリエ変換限界に近い時間圧縮と、単一 GHz 光子の計数技術であることを突き止めました。これらの実験技術は各要素としては存在しますので、これらを有機的に組み上げれば(図 2)、重力的に弱い結合領域まで、さらには、それよりも弱い結合領域まで、探索感度を上げられることを定量的に示すことに成功しました(図 3)。

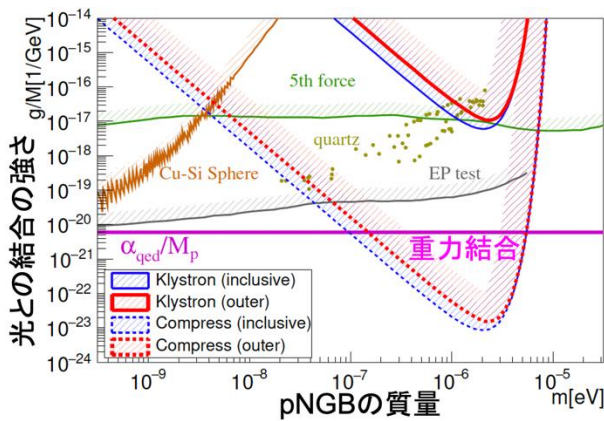


図3

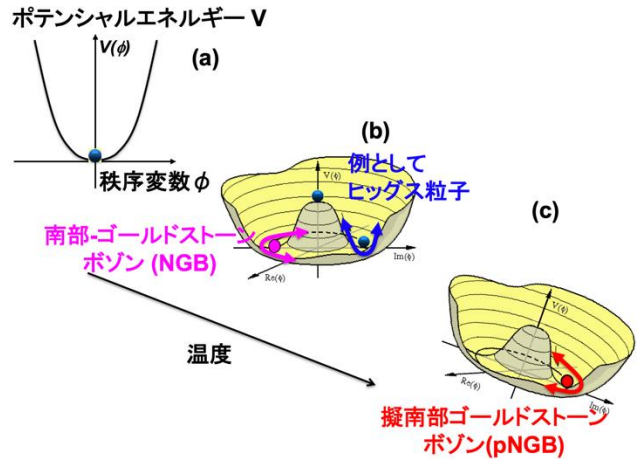


図4

図3：本観測手法により到達可能な pNGB の質量(m) vs 結合の強さ(g/M)に対する感度。重力的結合は太い水平線。レーダー光源を時間圧縮した点線曲線が、重力結合の水平線よりも下にあることが、重力よりも弱い結合に感度があることを示す。

図4：自発的対称性の破れと擬南部-ゴールドストーンボゾン(pNGB)の概念図。

【今後の展開】 イタリアの地下施設でアクシオン(強い力に関する粒子-反粒子変換かつパリティ変換の性質から理論的に要請される軽い pNGB 粒子で、暗黒物質の有力な候補)が太陽から飛来している兆候を示す信号が検出されたという報告が、2020年6月に発表されました^[2]。しかし、今後統計精度が上がり、仮に兆候が証拠に格上げされたとしても、その正体について決定打を出すことは難しく、アクシオンを光で直に作り出す以上に明快な方法はありません。この報告によれば兆候から推定される質量が 1eV 付近であるため、レーダーではなく、むしろ、レーザーで同等な探索を実施するのが理にかなっています。最終的に重力結合への感度に至るには、実験設備への大きな投資が必要となりますが、感度が重力結合域に到達する以前でも、更なる発見兆候の機会に恵まれることは多々あり得ます。今後、レーザーとレーダーの双方を駆使して、同観測手法により広い質量領域で、pNGB 探索を段階的に展開します。

【参考資料】

用語 1) ポテンシャルエネルギー

ポテンシャルエネルギーとは、力の源を表す観念です。例えば、重力のポテンシャルエネルギーは「坂」を表しています。坂に球を置けば、球は勝手に転がります。これは坂が潜在的に (potentially) 力を与えるからです。素粒子標準模型内の3つの力も、各々が従うポテンシャルエネルギーから生じます。

用語 2) 自発的に対称性を破る

物質の温度を変えると、気体、液体、固体などの相状態が入れ替わります。この相転移を論ずる際、密度揺らぎや磁荷など、相の秩序を表す変数に着目し、この秩序変数 ϕ の関数としてポテンシャルエネルギーの形状変化を温度と共に議論します(図4の(a)→(b))。例えば、ポテンシャルエネルギーの形状が秩序変数に対して対称であり、複数の同じ最小値を持つ場合でも(図1(b))、系がいずれかの最小値を選ぶと、その選ばれた地点に立つ人にとっては、周囲に谷があるように感じます。つまり、非対称に見えるようになります。このような選択結果による対称性の破れは、自発的に起こります。

用語 3) 南部-ゴールドストーン定理と擬南部-ゴールドストーンボゾン

図4(b)のようにポテンシャルエネルギーが2つの自由度を持っている場合、坂を転がり落ちた後、移動できる方向が2つ生じます。1つは坂を感じて振動する方向(例えば、ヒッグス粒子)で、もう一つは、坂を感じず自由に移動できる方向(南部-ゴールドスト

ーンボゾン)です。坂の急さが、素粒子の質量と対応づけられるので、移動方向に応じて質量が大きく異なります。ポテンシャルエネルギー全体が傾いている場合(図4(c))には、平らな方向でも若干坂があるため、若干の質量を持つこととなります。これが擬南部一ゴールドストーンボゾン(例えば、パイ中間子)に対応します。

用語 4) コヒーレント光波

レーザーやレーダーに代表される波の位相(リズム)が揃った電磁波のこと。

用語 5) 誘導(の喩え)

全国民の中から1人の総理大臣を選出するために、候補者を立てずに国民全員が任意の人に投票するのが自発的崩壊過程であるのに対し、候補者を立てて、投票が限られた人に集まるようにするのが誘導崩壊過程に相当します。その得票数の期待値は、各候補者が総理大臣になれる確率と対応づけられます。誘導光波は一人の候補者のみを立てる役割を担います。

【文献 1】“The first search for sub-eV scalar fields via four-wave mixing at a quasi-parallel laser collider”, Kensuke Homma*, Takashi Hasebe, Kazuki Kume, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014 (2014) no.8, 083C01, DOI: 10.1093/ptep/ptu087

【文献 2】日本経済新聞 2020年8月23日「宇宙の謎解明 粒子を発見？」サイエンス 26面の記事。原著 “Observation of excess electronic recoil events in XENON1T”, E. Aprile et al., arXiv:2006.09721v2 [hep-ex], <https://arxiv.org/abs/2006.09721>.

【謝辞】 本研究は、日本学術振興会科学研究費挑戦的研究(萌芽)「暗黒エネルギー源探索へ向けた GHz 帯誘導共鳴光子衝突実験実現性の検証(課題番号:19K21880、研究代表者:本間謙輔)」、同新学術領域研究(研究領域提案型)「高強度レーザー場による誘導共鳴散乱を介した eV 近傍質量域の暗黒場探索(課題番号:18H04354、研究代表者:本間謙輔)」、同基盤研究(B)「真空内四光波混合による sub-eV 暗黒場の高感度探索(課題番号:17H02897、研究代表者:本間謙輔)」、および、京都大学化学研究所共同利用・共同研究課題提案型研究(課題番号:2019-72、2020-85、研究代表者:本間謙輔)などの支援を受けて行われました。

【お問い合わせ先】

【研究に関すること】 広島大学大学院先進理工系科学研究科物理学プログラム 助教 本間 謙輔 TEL:082-424-7375(不在の場合、下4桁7370) E-mail: khomma@hiroshima-u.ac.jp
【報道に関すること】 広島大学財務・総務室広報部 広報グループ TEL: 082-424-3749 FAX: 082-424-6040 E-mail: koho@office.hiroshima-u.ac.jp

発信枚数：A4版 6枚(本票含む)

(別紙)

【FAX返信用紙】

FAX：082-424-6040

広島大学財務・総務室広報部 広報グループ 行
(E-mail：koho@office.hiroshima-u.ac.jp)

記者説明会（9月18日（金）13時30分・東広島キャンパス）のご案内

※「ZOOM」での参加も可能です

高強度レーザー混合による宇宙暗黒成分の革新的観測手法の発案
～ 未知素粒子群発見への突破口を開けるか ～

日時：令和2年9月18日（金）13時30分 ～ 14時30分

場所：広島大学東広島キャンパス

工学部小会議室（東広島市鏡山1-4-1）

ご出席（会場で参加）

ご出席（ZOOMで参加 ※）

貴社名 _____

部署名 _____

ご芳名 _____（計 名）

電話番号 _____

※ ZOOM で参加希望の方は、事前に招待メールをお送りしますので、メールアドレスをご連絡願います。 E-mail アドレス（ _____ ）

誠に恐れ入りますが、上記にご記入頂き、9月17日（木）17時までにご連絡願います。



【場所】
工学部小会議室