

和光原子核科学センター(WNSC)は、短寿命原子核を人工的に合成し、宇宙における重元素合成過程の解明や、全原子核領域にわたる網羅的な精密質量測定を推進している。理研 RIBF 施設内に設置した元素選択型質量分離装置 KISS(KEK Isotope Separation System)を共同利用施設として運営し、多核子移行反応で生成した短寿命核を用いて、崩壊核分光、レーザー核分光、精密質量測定を実施している。また、KISS の高度化計画である KISS-1.5 を推進するとともに、KISS に加えて GARIS-II、BigRIPS-SLOWRI など活用し、様々な短寿命核生成法で得られた核種に対して、MRTOF 質量分光器による精密質量測定を展開している。

(1) 大型ドーナツ型ヘリウムガスセルの開発と精密質量測定

KISS/KISS-1.5 では多核子移行反応で生成した中性子数 $N = 126$ 周辺やウラン周辺の中性子過剰な短寿命核の核分光実験を推進するために、大強度の重イオンビーム $^{136}\text{Xe}/^{238}\text{U}$ を利用可能な大型ドーナツ型ヘリウムガスセル (Doughnut-shaped He gas cell : DSHeGC) を開発してきた。ガスセル内に停止した短寿命核イオンを DC 電場と RF 進行波で出口孔まで約 0.1 秒で輸送することで、これまでの 10～100 倍の量の短寿命核イオンビームを生成できる。

図 1 は 2026 年 4 月に行った実験で生成した短寿命核を DSHeGC 内に捕集して、低エネルギービームとして引き出した後、KISS の精密質量測定器 MRTOF で測定した飛行時間スペクトルである。ヘリウムガスを用いることで多種元素の短寿命核に対して、同時に精密質量測定が可能となる。今後は、さらに効率よくイオン輸送を制御できる構造の工夫を施し、中性子過剰核の精密質量測定を中心とした核分光実験を進めていく。

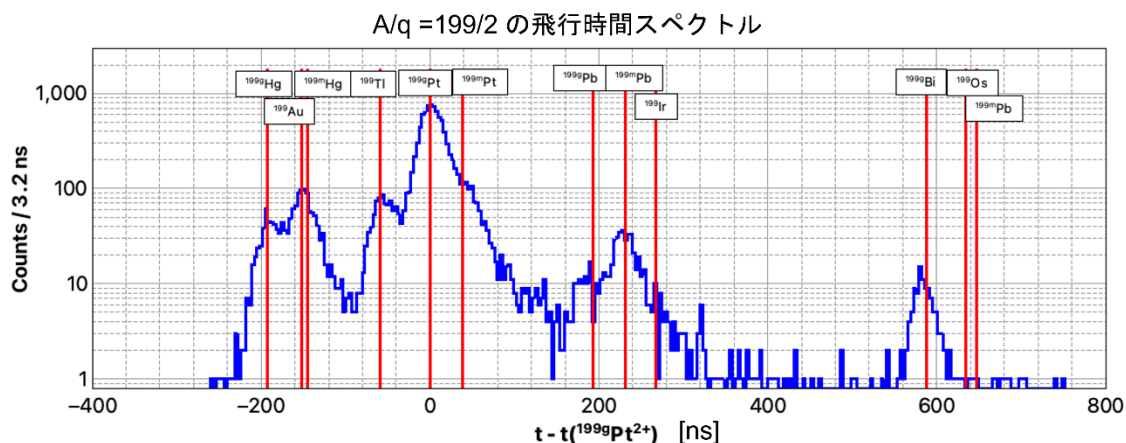


図 1 : KISS-MRTOF で測定した、ドーナツ型ヘリウムガス(DSHeGC)から引き出された質量数 199 の短寿命核の飛行時間スペクトル。MRTOF では 2 価イオンを分析している。

(2) ガスセル内レーザー共鳴イオン化核分光による核構造研究Ⅰ：レニウム(Re、 $Z=75$)同位体

レーザー共鳴イオン化核分光法は、生成量の少ない短寿命核の核構造を研究する上で非常に有効な手段である。レーザー分光法により原子の超微細構造(HFS)を調べることで、原子核の波動関数を反映する物理量である原子核スピンと電磁モーメントの測定、また原子核の形状を反映する物理量である荷電半径の変化量の導出が可能となる。

我々が研究対象としている重い領域、中性子数 $N=116-118$ 近傍の高融点元素（原子番号 $Z=72-78$ ）原子核では中性子数および陽子数に応じて、その形状がプロレート変形（縦長）、オブレート変形（横長）および球形等に形状が変化することが知られている。現状、世界の短寿命核施設において KISS のみがこの重い高融点元素のレーザー分光を行える施設である。この利点を活かして、これまで系統的なレーザー共鳴イオン化核分光実験を推進してきた。

系統的研究の一つとして、レニウム同位体 ^{190}Re の基底状態(半減期 3.1 分) ^{190g}Re と準安定状態(半減期 3.2 時間、励起エネルギー204 keV) ^{190m}Re のガスセル内レーザー共鳴イオン化核分光を KISS にて 2026 年 6 月に実施した。図 3 に準安定核 $^{187}\text{Re}(I^\pi = 5/2^+, N = 112)$ と短寿命核 ^{190g}Re および ^{190m}Re の HFS 分布の測定結果を示す。 ^{187}Re の HFS 分布はよく知られている典型的な $I^\pi = 5/2^+$ の HFS 分布のため、今回の測定によるレーザー核分光の応答関数の導出が可能である。この応答関数を適用することで $^{190g}, ^{190m}\text{Re}$ の HFS 分布を精度よく解析できる。

今後、原子核理論との比較から $^{190g}, ^{190m}\text{Re}$ のスピンと磁気モーメントおよび核構造を議論する予定である。

(3) ガスセル内レーザー共鳴イオン化核分光による核構造研究Ⅱ：イリジウム(Ir、 $Z=77$)同位体

これまで KISS では多核子移行反応を用いて安定原子核よりも中性子が 10 個程度多い中性子過剰な短寿命核を生成し、ガスセル内でのレーザー核分光を行ってきた。さらに研究領

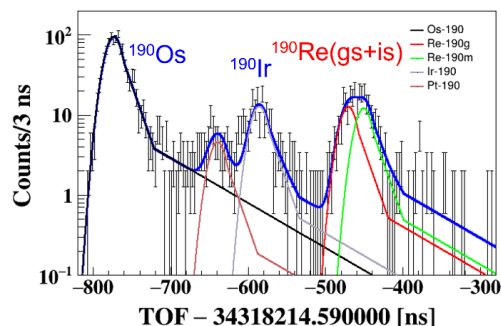


図 2：KISS-MRTOF で測定した飛行時間スペクトル。フィッティングすることで ^{190g}Re と ^{190m}Re の強度を導出し、図 3 を作成した。

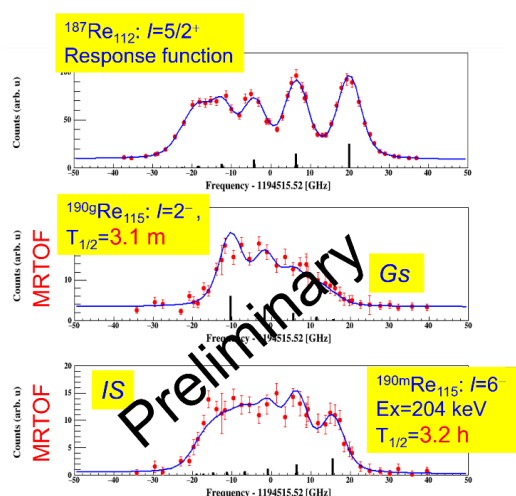


図 3: KISS で測定した HFS 分布(上) ^{187}Re 、(中) ^{190g}Re 、(下) ^{190m}Re 。縦線(黒)は各共鳴原子遷移の位置と強度。

域を広げるため、新たな試みとして核融合反応を使って、安定原子核よりも中性子が 10 個程度少ない中性子欠損短寿命核を生成する。これにより多様な原子核構造が現れる中性子数 $N=100$ 近傍の Ir、Os、Re などの高融点元素の短寿命核の核構造研究を展開できる。

2026 年 7 月に KISS にて、初めての核融合反応実験を実施して、中性子欠損 Ir 同位体を生成し、レーザー分光することに成功した。この実験はイギリス・ヨーク大学の研究者と共同で提案した実験である。海外から 7 名の研究者が参加した。

図 4 に得られたレーザー分光の結果を示す。質量数が 176 から 178 に変わるに従って、ピーク位置が変化している。また ^{176}Ir ピーク位置が ^{177}Ir と ^{178}Ir の間にあることから、原子核の形状変化が示唆される。現在、より詳細な解析と原子核理論との比較検証を進めている。

今回の成功を受けて、今後、KISS で核融合反応を利用して他の施設では実現困難な高融点元素の精密レーザー核分光を展開していく。

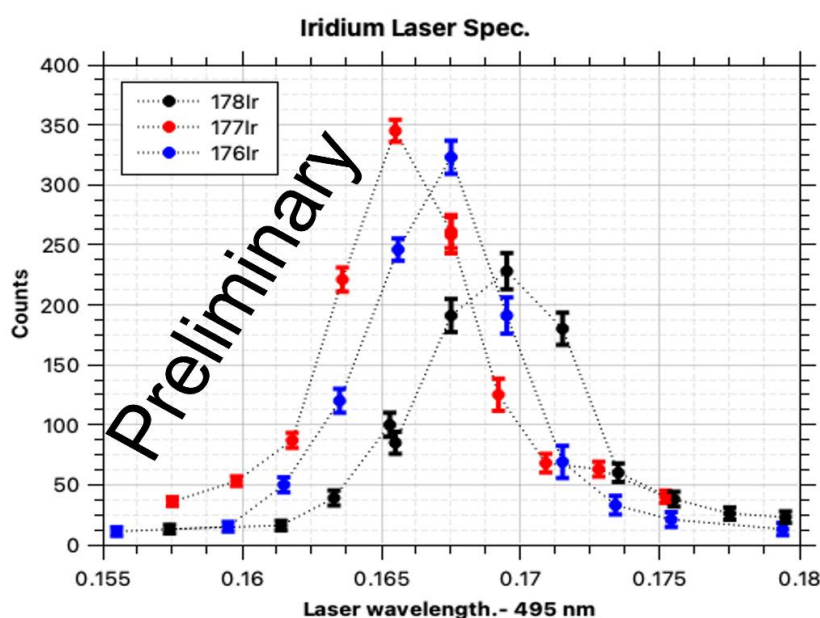


図 4 : KISS で生成した中性子欠損イリジウム同位体のレーザー分光結果。

(4) $^{136}\text{Xe} + ^{\text{nat}}\text{Er}$ 多核子移行反応を用いた中性子過剰核の精密質量測定

原子核の質量は、原子核の結合エネルギーを直接反映する基本物理量であり、元素合成過程の理論計算に不可欠なデータである。特に、太陽系元素の存在度に見られる希土類ピークの形成機構を理解するためには、中性子過剰なランタノイド核の高精度な質量データが必要である。しかし、この領域には実験的に質量が決定されていない核種が多く残されている。そこで本研究では、KISS 施設において多核子移行反応を用いた中性子過剰ランタノイド核の精密質量測定実験を行った。

実験では、核子あたり 10.75 MeV の ^{136}Xe ビームを $^{\text{nat}}\text{Er}$ 標的に照射し、多核子移行反応により中性子過剰な Er 同位体などを生成した。生成された反応生成核は KISS のドーナツ

型 He ガスセルで停止・輸送され、双極子電磁石により質量数選択された後、MRTOF 質量分光器へ輸送された。MRTOF 質量分光器では、イオンの飛行時間を測定し、既知質量を持つ参照イオンとの比較から目的核種の質量を決定した。

本実験では、質量数 $A=169, 171-174$ の生成核を測定した。これらの核種のうち、 ^{173}Er は初めて質量が測定された。図 5 に、今回得られた質量数 $A=173$ の核種の飛行時間スペクトルを示す。測定されたスペクトルに対してピークフィッティングを行い、核種ごとの飛行時間を決定した。これにより、これまでに質量が未知であった ^{173}Er の質量を決定した。

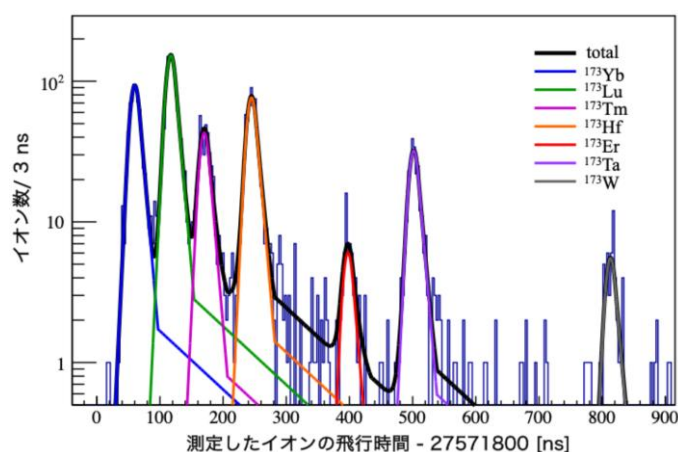


図 5: MRTOF 質量分光器で測定した質量数 $A=173$ の原子核の飛行時間スペクトル。赤実線は ^{173}Er のピーク成分を示す。

(5) 多核子移行反応を用いた新中性子過剰アメリシウム同位体の合成

中性子過剰なアクチノイド同位体は核図表上の未踏領域となっている。これは不安定短寿命核を生成する方法としてよく用いられる融合蒸発反応、核破碎反応、誘導核分裂反応ではアクセスが困難なためである。この領域は中性子数 $N=152$ における変形閉殻の存在やキロノヴァと呼ばれる爆発的天体現象で放出されたエジェクタのエネルギー源として近年注目されている。

近年、多核子移行(MNT)反応と呼ばれる反応が中性子過剰な未踏領域へアクセスするための手法として注目されている。この反応は原子核を核子の束縛エネルギーに近いエネルギーで衝突させることで複数核子交換が起こり、広い範囲の核種を合成可能な方法である。しかし反応生成物が広い運動エネルギー・角度分布を持つという特徴があり、これに特化した実験セットアップが必要な点がハードルとなっている。

中性子過剰アクチノイド同位体を対象とした実験を行う上での困難は合成方法だけではなく核種同定にもある。この領域の核種の半減期は数時間から数分と予想され、加えて崩壊様式が β 崩壊であるため崩壊事象の観測による核種同定は現実的ではない。そこで本研究では多重反射型飛行時間式(MRTOF)質量分光器と呼ばれる短時間で非常に高精度の質量測定を可能とする装置を用い、MNT 反応によって生成された核種の同定をその質量から行うことで解決した。

実験は理化学研究所仁科加速器科学研究センター内に設置されている MRTOF 質量分光器と極低温ヘリウムガスセルから構成される実験装置を用いた。目的の中性子過剰アクチノイド同位体はガスセル窓直前に置かれた ^{248}Cm 標的に ^{136}Xe ビームを照射することで生成

した。質量測定は4つの同重体シリーズ、 $A=246-249$ について実施した。 $A=249$ の測定では新アメリカシウム同位体である ^{249}Am を飛行時間スペクトルに確認することができた(図6)。結果として2つの新同位体を含む $246-249\text{Am}$ 同位体の質量測定に成功した(図7)。中性子過剰側において新規のアメリカシウム同位体の発見は約60年ぶりとなる。

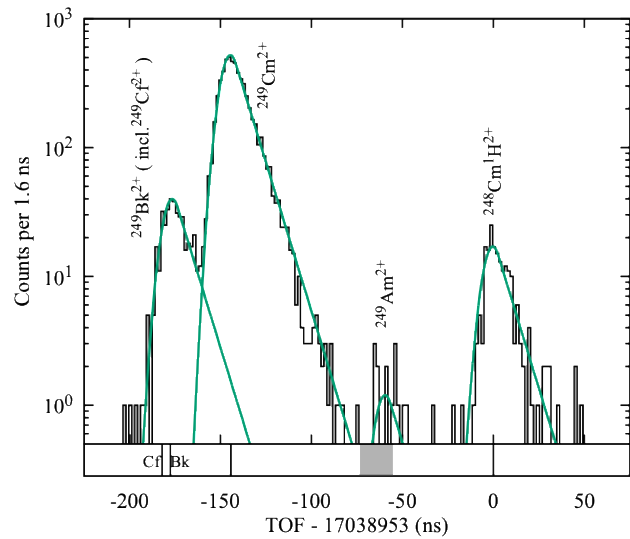


図6: $A=249$ 同重体シリーズの飛行時間スペクトル。下段灰色の帯は ^{249}Am の質量値の理論予測の範囲を示す。

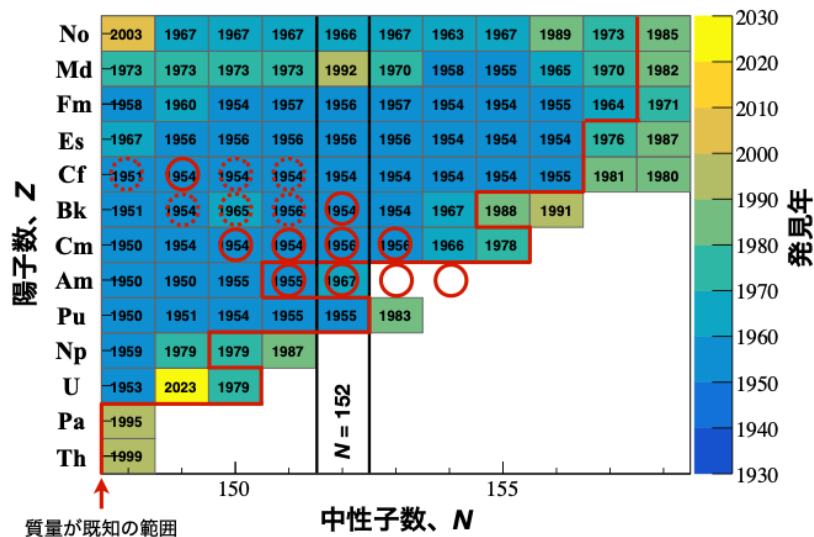


図7: 本実験で観測された核種。色は発見年を示す。赤い実線の丸印は単独のピークとして観測された核種、赤い波線の丸印は明確に分離したピークではないが、まとまったピークとして観測された核種を示す。赤い実線は、質量既知核種と質量未測定核種の境界を示す。

(6) コリニア精密レーザー核分光用レーザー開発: KEK 短期海外招聘 Mikael Reponen 氏

KEK-PIP2022に記載されているように、KISS/KISS-1.5では低エネルギーの重い短寿命核を生成し、精密核分光実験を推進し、重元素を合成する爆発的天体環境下で起こる速い中性子捕獲過程(r過程)の解明を目指している。その柱の一つとして精密レーザー核分光研究を進めている。KISS/KISS-1.5では、r過程時に生成される中性子魔法数 $N=126$ 近傍、原子番号 $Z=70-78$ 領域の高融点元素の中性子過剰未知原子核について、精密レーザー核分光によ

る核構造研究を世界で唯一実施できる。この利点を活かして、高融点元素の不安定核やアクチノイド核の精密レーザー核分光実験から原子核理論の新たな構築と改善を行い、重元素合成に関する研究で世界をリードしていくことが期待できる。

そのために、様々な元素に対して高分解能なレーザー分光を実現する原子励起分光用インジェクションロック型狭線幅チタンサファイアレーザー(ILTiS レーザー)を導入した。外部に波長変換装置を組み込むことで、全元素の約 70%について精密レーザー核分光に必要な波長への対応可能となる。この精密レーザー装置 ILTiS を開発することで、現在の KISS/KISS-1.5 での研究のみならず、将来の精密レーザー分光による基礎物理研究にも大いに応用することができ、研究テーマの幅を広げることができる。

今回招聘した Reponen 氏は、この ILTiS レーザーを熟知している世界でも希少な研究者の一人である。Reponen 氏のデザインをもとに製作した ILTiS (図 8 参照) を発振させて、オンライン実験時に適用できる ILTiS レーザーの高分解能化、レーザー強度およびレーザー波長固定機能の長時間安定性について最適化することができた。

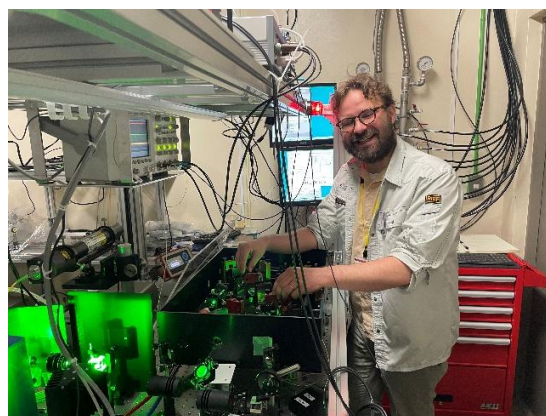


図 8 : Reponen 氏。ILTiS レーザーを調整中。

図 9 は KISS に設置したコリニア精密レーザー共鳴イオン化核分光用ビームラインである。精密レーザー共鳴イオン化分光領域で要求される直径 4 mm の平行イオンビーム形状に調整し、既存のビームライン同様の効率で MRTOF までイオン輸送できることを実証した。秋にオフラインでのレーザー分光を実施できるように中性化装置の準備を進めている。

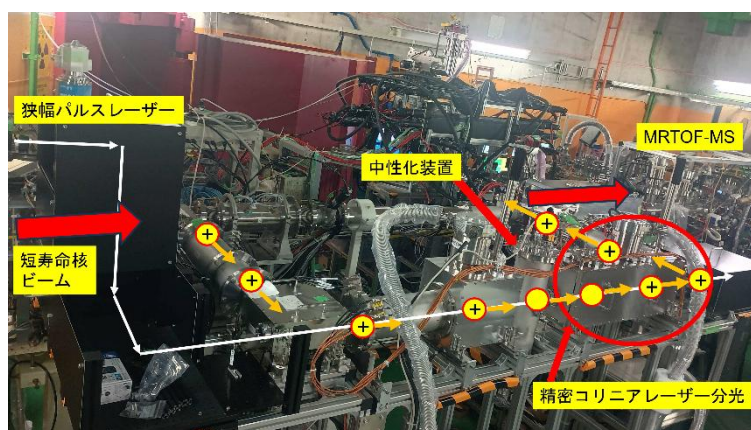


図 9 : 精密コリニアレーザーイオン化分光用ビームライン。中性化装置で中性化した原子ビームに対して精密コリニアレーザーイオン化分光を行う。

(7) KISS-1.5 計画の進捗

KISS の高度化を目的とする KISS-1.5 計画について、建設および機器整備を継続して進

めている。インフラ整備として、分電盤の設置、冷却水配管の敷設、RI輸送ビームライン設置用の壁面貫通孔の施工を行った。また、ガスセル内に捕集した反応生成核を引き出し、直接精密質量測定を行うための MRTOF 質量分光器を設置した。MRTOF 質量分光器については、真空排気系の整備および配線作業を行い、真空排気を開始した。さらに、ガスセルとイオン輸送系の製作を継続するとともに、それらを収納するハウジングチェンバーについても真空排気系、ガス供給系、冷却系の整備を進めている。今後は、各機器のオフライン試験を進めるとともに、全系を組み合わせた統合オフライン試験に向けて準備を進めていく。



図 10：実験室に設置した KISS-1.5 用のハウジングチェンバーおよび MRTOF 質量分光器。オフライン試験に向けて、真空排気系、ガス供給系、冷却系などの整備を進めている。

(8) プレスリリース

2026 年 4 月 14 日に、理化学研究所、筑波大学、大阪大学、東北大学、KEK の共同研究成果として、「電子を操って原子核の半減期を大きく変える」と題したプレスリリースを行った。本研究では、励起状態のトリウム 229 原子核について、原子核の周囲にある電子数を変えることで半減期を大きく変化させることに成功した。特に、1 価イオン状態のトリウム 229 アイソマーの半減期を 0.46 ± 0.08 秒と決定し、中性原子状態や 3 価イオン状態の場合とは大きく異なることを示した。この結果は、未観測の核壊変過程である電子架橋遷移の存在を示す重要な証拠であり、将来の原子核時計実現にもつながる成果である。本成果は *Nature Physics* に掲載された。

また、2026 年 6 月 11 日に、KEK と理化学研究所の共同研究成果として、「不安定核ランタン 149 の基底状態を識別し質量を精密決定」と題したプレスリリースを発表した。本研究では、MRTOF 質量分光器に β 崩壊検出機構を組み合わせ、ランタン 149 の質量と半減期を同時に測定することで、観測されたイオンが原子核のどの状態に対応するかを識別しながら質量を決定した。その結果、ランタン 149 の基底状態質量を高い確度で決定し、先行測定で示唆されていたランタン同位体に特有の二中性子分離エネルギーの振る舞いは見られないことを示した。本成果は *Physical Review Letters* に掲載された。